

## 明 細 書

## 光制御装置および光制御方法

## 技術分野

IAP20 Rec'd PCT 15 DEC 2005

- [0001] 本発明は、複数の波長成分からなる入射光に対して各波長成分毎に異なる空間光強度を与えることが可能な新しい空間光変調システムに関し、出射光の色調を容易に変化させることのできる特徴を生かした照明や表示用光源に関する利用法および装置、さらにこのような光を使用したプロセス制御法および装置に関するものである。

## 背景技術

- [0002] 光源の色調を変化させることは、各種照明や各種表示用光源ばかりでなく、レーザー加工やレーザープラズマX線発生、レーザー蛍光顕微鏡などの多数の用途があり、広範囲のスペクトル領域において多数の種類の色調を容易に得ることができる手法が実現すれば広範囲の産業分野における利用が期待できる。従来においては、数種類の異なった色の光源を用いて夫々の色の光源強度を独立に変化させたものを光合成することによったり、または、白色光を数種類の異なったカラーフィルターを透過させることによったりなどして、色調の異なった光を提供していた。
- [0003] しかしながら、複数の光源を用いて個々に光強度を制御したものを光合成する手法はシステムが複雑になり、またカラーフィルターを用いる方法は多数種類の色調変化を行なうことが困難であるなどの問題があり、光源の色調を多数の種類に変化させる簡単で自由度の高い手法が求められていた。
- [0004] 特に、複数の波長成分からなるレーザー光パルスを整形して目的に沿った光の波長ごとの空間的な分布を与える簡便な方法が望まれる。
- [0005] レーザ光はそのコヒーレントな特性により集光光学系を用いて波長オーダーまでビーム径を絞り込むことが可能であり、また光速度である30万km/secの超高速伝搬特性と合わせて、各種精密な高速プロセス制御に適用されている。しかし、レーザープロセスによるレーザープラズマX線発生やレーザー加工等においては、プロセス制御の目的であるX線発生強度や加工効率あるいは加工精度が、材料の種類や形状、レーザービームの波長、空間強度分布や時間波形など、非常に多くのパラメータに左右される

- 。
- [0006]   たとえば、レーザプラズマX線発生においては、発生したプラズマの温度および密度が時間的にも空間的にも短時間に複雑に変動する現象が見られる。このため、特定波長のX線を効率良く発生させるには、レーザプラズマの温度を最適温度に保つため、前記レーザプラズマの時空発展に追従して精密にプラズマ温度を制御できるような光を照射しなければならない。
- [0007]   特に、短パルスレーザを利用する場合には、真空中で短パルスの高強度レーザを集光してターゲットに照射したときに超高温のプラズマが発生し、例えば数十から数百km/secの速度で $\mu\text{m}$ のプラズマ領域が膨張するので、超短時間の領域で有効な制御手法が要求される。
- [0008]   したがって、上記プラズマを制御するための光は、例えばレーザプラズマX線発生の場合にプラズマの電子温度が時間的にも空間的にも最適温度を保つような形態を与えるなど、反応プロセスが最適経路に近づくための精密な制御を行なう必要がある。
- 。
- [0009]   「反応プロセスの最適経路」に近づかせるためには、パルス時間波形や空間光強度分布を制御すればよいが、従来は空間光強度分布とパルス時間波形を同時に制御することは容易ではなかった。特に、液晶の応答速度限界であるms以下の時間間隔の領域に関しては、レーザビームの空間光強度分布と時間波形を同時に精密に制御することは装置が複雑で大型化する等の難点があり、非常に困難であった。
- [0010]   従来、たとえば、複数の波長成分からなるレーザ光パルスの整形法として、波長可変レーザと空間光変調素子を組み合わせたものがある。波長可変レーザは、光増幅波長帯域の広いレーザ媒体を回折格子やプリズムなどの波長選択フィルターで特定波長を選択して発振させるものである。音響光学素子からなる回折格子を電氣的に制御すれば、高速度応答する波長別光パルス発振をさせることができる。
- [0011]   また、空間光変調器を波長ごとに準備して、波長可変レーザの出力をダイクロイックミラーなどを用いて波長ごとに分離し、波長により異なる変調パターンを持つ空間光変調器を通して、再び光を合成するようにしたものでは、光パルスの異なる波長ごとに異なる空間光強度分布を与えることができる。

- [0012] しかし、波長切替速度は最短で $\mu$ s水準である波長選択フィルターの切替速度に依存するが、また、最短でms水準である空間光変調素子の切替速度に依存する。したがって、これら要素の組み合わせで構成される空間光強度分布の切替速度は、光速となるms水準より短くすることはできない。
- [0013] 複数の波長を含む超短光パルスの波長ごとに位相を変調するものとして、非特許文献1に記載されたような、回折格子対の片方に超短光パルスを入射させて回折格子の回折角分散特性に基づいて波長分離し、回折角度が分散した光を波長ごとにレンズで光軸が平行になるようにそろえて集光し、光軸に垂直な方向にスペクトル展開して形成するフリーエ面に液晶空間光変調素子を挿入し、光変調素子の透過光を再びレンズで集光して回折格子対のもう一方の上に収束し合成することにより、波長ごとに時間的位置としての相対位相を調整した出射光パルスを生成させる方法がある。
- [0014] また、非特許文献2に記載された複屈折結晶と音響光学素子が作る回折格子を組み合わせた音響光可調節分散フィルタシステム(AOPDF)により、パルスの時間波形を超短時間領域で任意に変化させることができる。論文では、実験により30fsの超短光パルスを17fsに圧縮することができたとしている。
- [0015] しかし、これらの方法では全ての波長について同じパターンの空間光強度分布を与えることになるので光調整の自由度が低く、各波長ごとに異なる光強度パターンを持たせることはできない。
- [0016] さらに、特許文献1には、短パルスレーザをビームスプリッタにより光強度の異なる主パルスと副パルスに分割し、光学遅延回路で一方を他方より遅延させるように調整し2連パルス化したレーザビームを金属ターゲットに照射してX線を得るようにしたマッハツェンダー干渉計方式のパルス時間波形整形方法が開示されている。この方法では、パルス間の時間間隔と主パルスと副パルスの光強度を別々に調整することができる。しかし、波長の異なるパルスを利用することは開示されていないし、示唆もない。
- [0017] また、非特許文献3には、時間的に偏光状態が変化する高強度フェムト秒レーザーパルスの発生方法が記載されている。記載された方法では、チャープパルス増幅法

により発生した入射レーザーパルスをビームスプリッタにより参照光と信号光に分割する。参照光は半波長板を用いて斜め45度方向の直線偏光にしてx, y両成分を持つようにし、信号光との相対遅延時間を固定する。信号光は干渉計に入射し時間依存偏光パルスを生成する。時間依存偏光パルスはビームスプリッタで参照光と同軸上に相対遅延時間で組み合わされた後、ポラライザ(偏光ビームスプリッター)によりx成分とy成分に分割され、分光器に入射してx, y成分のスペクトル干渉信号を生じる。このように、高強度フェムト秒レーザーパルスを干渉計を用いて分割し、直交する偏光成分間に遅延を与えて再合成することで時間的にパルスの偏光特性が変化するパルスを発生させることができる。

[0018] しかし、この方法では、空間光強度分布を調整することはできず、当然、波長ごとに光強度を変化させた、より高い自由度を持った加工を可能にするようなレーザ光を得ることはできない。

[0019] また、本願発明の発明者らが先に開示した特願2002-073365には、短パルスレーザー光をハーフミラーで分割して光学遅延回路で光路長差を与えるとともに、可変形鏡を併用して同時にそれぞれの光路の空間光強度分布を調整可能にした光パルス制御システムが示されている。

[0020] しかしながら、特定波長のX線を効率良く発生させるために「反応プロセスの最適経路」にできるだけ近づけるような、時空発展するレーザプラズマの温度制御を行なうためには、多数の種類の空間光強度分布を備えた一連のシート状の光パルスを用意して、短時間の間に適当な時間間隔で逐次照射する必要がある、そのための光学系は特願2002-073365で開示した光学系を複数台組合わせることにより実現したとしても、光学系が複雑で大型化する等の難点があった。

[0021] なお、特許文献2には、ファラデー回転子とTN(twisted nematic)液晶と検光子を用いて、機械的駆動部がないアライメントフリーな光分離装置が開示されている。開示装置は、光通信で用いられる2種類の波長 $1.3\mu\text{m}$ と $1.5\mu\text{m}$ の直線偏光に90度の偏光方向の差を生じさせておいて、検光子で分離するものである。この発明は、2種類の波長成分を切り換えるだけで、空間光強度分布を調整することにより光制御の自由度を増大させるという技術的思想を有しない。



- [0022] また、特許文献3には、ファラデー回転子とTN液晶と検光子を用いた光アイソレータが開示されている。開示されたアイソレータは、特定の直線偏光を透過させる偏光子と検光子の間に旋光性の液晶回転子とファラデー回転子とを配置したものである。ファラデー回転子は光の透過方向によらず偏光面を同じ方向に回転させるので、往路の光を透過させるように調整すると、復路の光を偏光板で遮光することになる。開示発明は、光通信に使う光信号をON/OFFするための装置で、空間光強度分布を調整する思想がない。
- [0023] このように、従来技術における光変調装置には、光源からいろいろな色調を引き出したり、複数の波長成分ごとにそれぞれ所望の空間光強度分布を与えるようにするのは無かった。特に、ms以下の時間差すなわち位相差で波長ごとにそれぞれ異なる空間光強度分布を持たせる手段はなかった。また、プロセスに対して理想的な精密制御を行うためには、複数の波長成分からなる光を使って波長ごとの空間光強度分布をそれぞれ最適な光強度分布に設定すると共に、波長ごとの位相差も自由に設定することができることが好ましい。
- [0024] さらに、近年、超短光パルスを用いた化学プロセスの計測・制御に関する研究が盛んに行われてきている。現在は、超短光パルスを用いて化学反応プロセスの量子制御やレーザプラズマX線の超高速プロセスの制御に関する研究などが行われているが、時間領域と空間領域の光パルス構造を同時に制御することができれば、さらに精密なプロセス制御が行えることは明らかである。
- [0025] 時間特性と空間特性を同時に制御しようとするれば、超短光パルス時間領域に関しては、従来技術の液晶等を使用した空間光変調素子やデフォーマブルミラーを用いる方法では応答速度が不足するため、光学遅延回路と空間光強度分布を制御する光学系を組み合わせたシステムにより空間光強度分布の異なるパルス列を組み合わせる手法が用いられてきた。
- [0026] このような光学系の代表的なものとして、1994年にフィンランドのヘル(S.W.Hell)らが最初に報告した蛍光抑制(STED: Stimulated Emission Depletion)方式の超解像蛍光顕微鏡に適用したシステムがある。しかし、STEDに適用した例は、2種類の光について強度分布があれば十分である特殊な例を対象にしたものであり、より広範囲

な利用形態にも適用可能にするためには、多数の種類の光強度分布を時間方向に展開する必要があり、寸法や効率、費用の問題が生じて現実的に利用可能な光学系とすることはできない。

特許文献1 特開平08-213192号公報

特許文献2 特開平10-161064号公報

特許文献3 特開平05-241100号公報

非特許文献1 神成文彦他「アダプティブ制御によるフェムト秒レーザパルス整形と光励起過程への応用」レーザ研究、2000年8月、479-485頁

非特許文献2 F.Verluse et.al. "Amplitude and phase control of ultrashort pulses beuse of an acousto-optic programmable dispersive filter:pulse compression and shaping", OPTICS LETTERS, Vol.25, No.8, pp.575-577, April 15, 2000, Optical Society of America

非特許文献3 欠端雅之他「時間的に偏光状態が変化する高強度フェムト秒レーザパルスの発生」レーザ学会学術講演会第22回年次大会講演予稿集、2002年1月、13-14頁

## 発明の開示

### 発明が解決しようとする課題

[0027] 本発明が解決しようとする第1の課題は、広範囲にわたって光源の色調を連続的に変化させることにより多数の色調を容易に作り出すことができる簡単な光学装置および手法を提供することである。

[0028] また、本発明が解決しようとする第2の課題は、強誘電性液晶の光学的スイッチングに関する応答速度限界を超えたms以下の時間間隔の領域において、レーザの波長ごとに空間強度分布と時間波形を同時に精密に調整することができるレーザパルス制御方法と簡単な光学装置を提供することであり、さらに、各種材料または試料にレーザを照射してレーザプラズマX線を発生させるときに特定波長のX線強度を選択的に制御する等のプロセス制御を的確に行うようにレーザ光を調整する機構を備えた光制御方法と光学装置を提供することである。

[0029] また、蛍光抑制方式の超解像走査型レーザ蛍光顕微鏡(STED)において、単一

の光学系で蛍光励起光と蛍光抑制光を発生することができる簡易型光学系を備えた装置と光制御方法を提供することである。

#### 課題を解決するための手段

- [0030] 上記課題を解決するため、本発明の光制御装置は、波長によって旋光角が変わる旋光分散特性を有する旋光子と、検光子と、入射面全面あるいは入射面上の部位ごとに入射光の偏光面の旋光角を旋光回転により変えることができる空間光変調素子を備えて、入射光が旋光子と空間光変調素子と検光子を順に透過するように構成した光学系を構成したことを特徴とする。
- [0031] このように構成した本発明の光制御装置では、複数の波長成分からなる直線偏光を入射して旋光子を透過させ各波長成分ごとにそれぞれ独自の旋光角を有するようにして分けた後に、全面あるいは部位ごとに波長成分の内のいずれかの偏光面の旋光角に合わせて旋光回転を調整した空間光変調素子に旋光子を透過した光を入射させて各波長成分ごとに偏光面旋光角を検光子の向きに対して所定の関係を有するように調整し、この光を検光子を通過させることにより、各波長成分ごとに異なる空間光強度を有する出射光として放出することができる。
- [0032] 波長によって旋光角が変わる旋光分散特性を有する旋光子には、水晶結晶やTN (twisted nematic) 液晶などの光学活性物質からなる自然旋光材料で形成されるもの、ファラデー回転子などがある。
- [0033] 水晶結晶やTN液晶は、ある特定の方向にのみ旋光性を表す。また、光の進行方向を逆にすると偏光面の回転方向も逆になるので、光がこれら物質を往復すると偏光面は丁度元の状態に戻る。水晶結晶の旋光性は、電場や磁場の影響を殆ど受けないが、TN液晶の旋光性は印加する電場の強さにより変化する。なお、スクロール溶液のような等方性物質では任意の方向に透過する光について旋光性を表す。
- [0034] ファラデー回転子は、物質を透過する光の振動面が磁場により回転するファラデー効果を利用した光学素子である。ファラデー効果は、物質が非磁性体である場合には、振動面の回転角  $\theta$  が、磁場の強さ  $H$ 、物質中を光が伝搬する道筋の長さ  $L$ 、光の伝搬方向と磁場のなす角  $\phi$  の余弦値  $\cos \phi$  の積に比例する。比例定数  $V$  をベルデ定数と言い、物質の種類や波長によって決まる。なお、物質が磁性体である場合は、

ファラデー回転角は、印加磁場ではなく磁化に比例する。

- [0035] ファラデー回転子は、光の進行方向を逆向きにしても偏光面の回転する方向が変わらないことが特徴で、特許文献3に開示された光アイソレータは、この光の進行方向によって偏光面の回転する方向が変わらない性質を用いたものである。
- [0036] ファラデー回転子は、自然旋光性材料を用いたものより旋光分散特性が強いものが多いが、代表的なファラデー光学磁性体物質であるビスマス鉄ガーネット( $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ )の結晶を用いたものは特に旋光性が強い。飽和磁化状態のビスマス鉄ガーネット結晶中で波長帯域700nmから800nmの光を磁場方向に進行させると、光が伝搬する道筋の長さ1cm当たり約18000度の偏光面回転偏差が生じる。したがって、結晶の厚さを50  $\mu\text{m}$ にすると、波長による磁気回転分散の大きさがちょうど90度程度になる。
- [0037] なお、偏光子を備えて入射光が初めに偏光子を通過するようにすると、直線偏光でない光線についても偏光子で所定の偏光面を有する光になるので、直線偏光と同様の処理が可能になることは、先に説明した主発明の光制御装置と同様である。
- [0038] この光制御装置に用いる入射光の偏光面の旋光角を旋光回転により変える空間光変調素子として、代表的なものにネマティック液晶の捻れネマティック効果を利用したTN (twisted nematic) 液晶がある。
- [0039] TN液晶は、たとえば、透明電極を塗布した2枚のガラス基板の間に誘電異方性が正のネマティック液晶を10  $\mu\text{m}$ 程度の厚さに挟み込み、液晶分子の長軸が上下の基板間で連続的に90度捻れるように構成したツイスト(TN)配列セルである。TN配列セルの捻れピッチは可視光の波長と比べて十分に大きいので、ガラス基板に垂直に入射した直線偏光の偏光方向はセルを通過中に液晶分子の捻れに沿って90°回転し入射光は90° 旋光する。ここで、TN配列セルに電圧を印加すると、ある閾値電圧 $V_{\text{th}}$ を超えるところから液晶分子長軸は電場方向に傾き始めて $V_{\text{th}}$ の2倍程度の電圧で飽和する。入射直線偏光の旋光角度は、液晶分子の捻れに依存するため電圧が高くなるにつれて小さくなりついには旋光角度が0° になる。したがって、液晶セルに対する印加電圧により入射直線偏光の旋光角を調整することができる。
- [0040] 液晶装置は、回路印刷技術を用いて透明電極を適切に配置することにより、個々



に印加電圧を調整できる微細なセルを密着して配列させることができるので、直線偏光が入射する光軸に垂直な面を適当なゾーンに分けてそれぞれ適当な偏光面回転角を与えることができる。

[0041] このような液晶装置を用いて、波長ごとに異なる偏光面角度を有するような光を入射させると、入射面上の各部に設定された偏光面回転角が各波長の偏光面角度に加わるので、その偏光角加算値が検光子の透過偏光面の方向と一致した波長成分が光制御装置の出射光として取り出される。

[0042] したがって、液晶装置の入射面上の部位によって出射光として取り出される波長成分が決まり、TN液晶装置は空間光変調素子として機能する。なお、空間光変調素子を透過した光の偏光面の傾きと検光子の透過偏光面方向がずれているときには検光子を透過する光量がそのずれ角に応じて増減するので、波長ごとの光強度の調整を行うこともできる。

[0043] このように、本発明第1の光制御装置は、入射光である複数の波長成分から成る直線偏光を旋光分散を有する旋光子に透過させ、波長毎の偏光面回転角を変えた後、液晶などのように単一又は多数の独立な区画に分割された偏光面回転子から成る空間光変調素子を透過させることにより波長別の空間光強度分布が所定のパターンになるように調整することができる。

[0044] 上記のような波長毎に空間光強度分布を変えることの特性は即ち色調の空間分布の変化を与えることを意味するので、前記の照明や表示法において様々なバリエーションをさらに付加することができて非常に有用である。

[0045] さらに、本発明の光制御装置は、波長別に位相を制御可能な光学素子、すなわち波長別位相変調素子と組み合わせることにより、同時に光パルスの時間波形も所定のパターンになるように調整することもできる。

[0046] 波長別位相変調素子の例として、フーリエ光シンセシス光学系と呼ばれる光パルス整形光学系を挙げることができる。フーリエ光シンセシス光学系は、回折格子、集光光学系、空間光変調素子、集光光学系、回折格子の順に集光光学系の焦点距離の間隔で並べたもので、多波長成分を含む入射光を回折格子でスペクトル分解し、集光光学系で光軸に垂直な方向にスペクトル展開し、空間光変調素子で各波長成分

ごとの光路長を変化させて位相差を所定の値に調整することができる。透過した光はその後集光光学系を通り回折格子で光ビームに収束する。フーリエ光シンセシス光学系により、光ビームに含まれる波長成分が時間軸方向に展開された光ビームを得ることができる。

[0047] そこで、波長別位相変調素子を旋光子もしくは空間光変調素子と同時に使用することによって、光ビーム内の波長成分ごとに精密な空間光強度分布の調整をすると共に時間波形の調整も可能になる。本発明の光制御装置は、数個の光学素子を組み立てて簡単に構成することができ、このような簡便な装置によって光の精密な時間空間構造(空間光強度分布および時間波形)の制御を容易に実現することができるようになった。

[0048] また、本発明第2の光制御装置は、上記の旋光子と、入射面全面一様にあるいは入射面上の部位ごとに入射光の位相を調整することができる空間光位相変調素子を備えて、入射光が旋光子と空間光位相変調素子を順に透過するようにした光学系を構成することを特徴とする。ここで、空間光位相変調素子は光軸に垂直な2個の直交座標軸において1方向の偏光成分にのみ位相変調が作用するような素子である。空間光位相変調素子は、たとえば、分子軸が1方向に向くように液晶分子を配向した平行配向ネマチック液晶を用いて構成することができる。

[0049] 複数の波長成分からなる直線偏光を入射して旋光子を透過させ各波長成分ごとにそれぞれ独自の旋光角を有するようにした後に、入射面上の部位ごとに位相変化量を調整した空間光位相変調素子に旋光子を透過した光を入射させると、各波長成分ごとに偏光面の傾きが異なるので、2個の直交座標軸それぞれの方向に偏光した成分の割合が異なり、空間光位相変調された成分と空間光位相変調されない成分の合成光が出射光になる。この出射光を集光光学系で集光すると、焦点位置における光強度分布として各波長成分ごとに空間光強度分布の異なった遠視野像が形成される。

[0050] 空間光位相変調素子は、光の進行軸に対して垂直の面を規定する2軸の座標軸の1軸方向の偏光成分のみ光路長を変えることにより異なる位相遅延を生じさせる光学素子で、たとえばネマチック液晶の屈折率異方性を利用した2次元光位相変調器

を使用することができる。

- [0051] 2次元光位相変調器は、屈折率異方性のある液晶分子を長軸が光軸に垂直な同一方向を向くように平行配置することにより、偏光面の旋光回転を生じないで純粹に位相のみを制御できるようにした液晶装置である。液晶層を挟む透明電極に電圧が印加されると印加電圧に対応して液晶分子長軸が光軸方向に傾き、長軸方向に偏光した光に位相遅延の変化を与える。一方、分子長軸方向に対して垂直の方向に偏光した成分は印加電圧により長軸方向が変化しても位相が変化しない。入射する直線偏光は、偏光方向に応じて分子長軸に平行な偏光成分と分子長軸に垂直な偏光成分の割合が異なるので、入射光の偏光面角度によって異なる位相遅延を生じる。また、印加電圧値によっても異なる位相遅延を生じる。
- [0052] そこで、空間光位相変調素子の2次元位置にそれぞれ適当な電圧を印加して所定の位相遅延パターンを形成しておいて、複数の波長成分からなる直線偏光を入射し旋光子を透過させる。すると入射光は波長ごとに異なる偏光面回転角が与えられ、この光線は位相遅延が2次元パターンとして設定された空間光位相変調素子に入射する。空間光位相変調素子を出た光線は、入射面上の位置ごとにそれぞれ独立に設定した印加電圧に従い、また、波長ごとに異なる偏光面角度に従って、それぞれ空間光位相変調がなされた偏光成分と空間光位相変調を受けない偏光成分が異なる割合で合成された出射光となる。
- [0053] このように空間光位相変調素子の出射側表面上に得られた近視野強度分布すなわち近視野像、および近視野位相分布を有する光は、集光光学系を介して波長成分および互いに直交した偏光成分ごとに干渉し、その焦点位置にそれぞれの近視野像に対応して波長ごとに異なる光強度を持った遠視野像として現れる。したがって、必要な遠視野像を形成するような適宜な近視野位相分布を生成するように空間光位相変調素子を調整する。近視野像および近視野位相分布から遠視野像を求める手法は波動光学において確立しており、予めシミュレーションや実験により視覚的に把握しておくことができる。
- [0054] したがって、空間光位相変調素子を用いるときは、出射光を検光子に通さないで遠視野像の空間光強度分布を制御することが可能なので、光を減衰させずに効率よく

光エネルギーを利用することができる。

- [0055] なお、旋光子の前に偏光子を配置すれば、旋光子に入射する光線の偏光面を選択することができるので、直線偏光でない光線を使っても同様の効果を得ることができる。
- [0056] このようにして光パルスの時間空間構造の時空制御を施した多波長成分を含有するレーザーパルスを物質に照射して、熔融・蒸発などの熱反応、原子核反応、プラズマ反応、化学反応、同位体分離、蛍光発生などのプロセスを生起させることができる。こうしたプロセスにより、レーザー加工、化学物質や元素の合成、分解、分離などや、原子、分子、イオン、電子、陽電子、中性子、クラスターなどの粒子生成や、X線、 $\gamma$ 線などの電磁波の発生や、蛍光の発生・制御を行なわせることができる。上記技術は、半導体、化学、エネルギー、医療、機械などの産業分野や、粒子加速器や生体物質の検査などの基礎研究などへの応用が期待されている。
- [0057] 本発明の光制御装置を用いてレーザー光の空間強度分布と時間波形を調整することにより、発生させるX線の特性を精密に制御することができるので、上記プロセスの最適な制御を行なうことが可能になる。
- [0058] また、本発明の光制御装置により生成したレーザー光をターゲットに照射してX線を発生させることにより、ターゲット位置におけるレーザー光の空間強度分布と照射時間間隔を適宜調整することができるので、上記プロセスの設計を微細な点にわたって行なうことができる。
- [0059] また、X線の強度特性として波長特性を測定し、目的とする特定波長におけるX線の強度の計測値に基づいて、レーザービームの強度分布および空間光位相分布の調整を行なうことができるようにしてもよい。発生させるX線は目的によって決まる適正な波長成分が多く含まれるようにすることが好ましい。また、目的とする波長のX線強度を測定して、当該波長成分の強度が大きくなるように空間強度分布および空間光位相分布を調整するようにすることができる。
- [0060] さらに、レーザープラズマX線発生装置においては、ターゲットに集光した位置におけるレーザービームの空間強度分布およびパターンは、先にターゲットに到達する光パルスの先頭部分が光軸の中心部にエネルギーの集中した空間光強度分布をしてお



り、後からターゲットに到達する一連の光パルス空間強度分布が、レーザプラズマの膨張に追従して順次ビーム径が拡大しつつ中心部の光強度が弱く周辺部の光強度の強い円環状の空間分布をしていることが好ましい。ターゲットを照射するレーザ光パルスが上記のような空間分布および位相分布をとることにより、より広い空間領域およびより長い時間にわたって、レーザプラズマ中の電子温度を特定波長のX線を発生するのに適した値に保持することができて、目的とする波長のX線を効率よく発生させることができる。

- [0061] 本発明の光制御装置によれば、レーザ光を変成して波長毎に空間強度分布の異なる所定のパターンの光として発生させることができるので、この光を蛍光抑制(STED: Stimulated Emission Depletion)方式の超解像走査型レーザ蛍光顕微鏡に適用することができる。このとき、広帯域スペクトル中の試料中の蛍光と同一波長の波長成分を広帯域スペクトル中から選び出して誘導放出による蛍光抑制の目的に使用し、その他の波長の光は蛍光励起光として使用する。上記、蛍光励起光と蛍光抑制光を単一の光学系により同様に発生させることができるので装置を簡素化することができる。
- [0062] また、本発明の光制御方法は、旋光分散特性を有する旋光子に複数の波長成分からなる直線偏光を入射して各波長成分ごとに異なる偏光角を与え、旋光子透過後に空間光変調素子を透過させて入射面全体あるいは面上の部位ごとに偏光面の旋光角を変え、空間光変調素子通過後に検光子を透過させることにより、各波長成分ごとに空間光強度分布を制御した出射光として出射させることを特徴とする。
- [0063] さらに、旋光分散特性を有する旋光子に複数の波長成分からなる直線偏光を入射して各波長成分ごとに異なる偏光角を与え、旋光子透過後に空間光位相変調素子を透過させて入射面全体あるいは面上の部位ごとに入射光の空間光位相を変えることにより、各波長成分ごとの空間光強度分布を制御した出射光を得るものであってもよい。
- [0064] なお、本発明の光制御方法は、さらに波長別位相変調素子を備えて波長成分ごとの光位相を調整するようにしてもよい。
- [0065] また、波長別位相変調素子による波長成分ごとの光位相の調整を旋光子、空間光

変調素子、空間光位相変調素子などによる空間光強度の調整と併せて行って、出射光の波長成分ごとの位相および空間光強度分布または空間光位相分布を同時に制御するようにすることもできる。

[0066] さらに、光の出射側位置に集光光学系を備えて、出射光を集光するようにしてもよい。

[0067] 本発明の光制御方法は、波長成分ごとに空間分布の異なる複数の波長成分を組み合わせた効果を活用して、各種照明や表示用光源やプロセス制御に利用することができる。

### 図面の簡単な説明

[0068] [図1]第1実施例の別の態様における光制御装置を示すブロック図である。

[図2]ビスマス鉄ガーネットにおける旋光回転角の波長分散係数を示す図面である。

[図3]TN液晶における旋光回転角度の電圧依存性を示すグラフである。

[図4]第1実施例における旋光角回転パターンの典型的な例を示す図面である。

[図5]第1実施例の光制御装置において、空間光変調素子が波長ごとに異なる空間強度分布を与える機構の概念図である。

[図6]第1実施例における空間光変調素子を含む光制御装置において、波長成分毎の空間光強度を制御する手法の概念を説明するブロック図である。

[図7]第1実施例において偏光子を付加した光制御装置における制御手法を模式的に説明するブロック図である。

[図8]旋光分散素子と検光子の作用を模式的に説明するブロック図である。

[図9]第1実施例において偏光面回転角空間分布を制御する場合についてガウス分布型の近視野像の1例を示す3次元図面である。

[図10]図9の近視野像に対応する遠視野像をシミュレーションで求めた結果を示す3次元図面である。

[図11]近視野像の別の例を示す断面図である。

[図12]図11の近視野像に対応する遠視野像を示す断面図である。

[図13]近視野像のさらに別の例を示す断面図である。

[図14]図13の近視野像に対応する遠視野像を示す断面図である。

[図15]近視野像の断面プロファイルの3次元表示図面である。

[図16]図15の近視野像に対応する遠視野像の断面プロファイルの3次元表示図面である。

[図17]第1実施例において偏光面回転角空間分布を制御する場合において1次ベッセル関数型の近視野像の1例を示す3次元図面である。

[図18]図17の近視野像に対応する遠視野像をシミュレーションで求めた結果を示す3次元図面である。

[図19]本発明第2実施例の光制御装置の基本構成図である。

[図20]フーリエ光シンセシス光学系の概念図である。

[図21]第2実施例の光制御装置の作用を模式的に説明するブロック図である。

[図22]第2実施例の別の態様における光制御装置を示すブロック図である。

[図23]第3実施例の光制御装置の作用を模式的に説明するブロック図である。

[図24]集光光学系により近視野像から遠視野像が形成される原理を説明する線図である。

[図25]第3実施例において入射光が平面波である場合の近視野像を表示した立体座標図である。

[図26]図25の入射光に与える位相回転を表示した図面である。

[図27]図25の近視野像に対応する遠視野像を表示した立体座標図である。

[図28]図27の遠視野像を軸を通る面で切った断面図である。

[図29]第3実施例において入射光の偏光角が $20^\circ$  のときの遠視野像の断面図である。

[図30]第3実施例において入射光の偏光角が $90^\circ$  のときの遠視野像の断面図である。

[図31]第3実施例において、さらに別の近視野像を表示した立体座標図である。

[図32]図31に対応する遠視野像を表示した立体座標図である。

[図33]第3実施例において、ガウス関数分布型の近視野像を入射光偏光角の変化に対して立体座標上に表した図面である。

[図34]図33近視野像を集光光学系で焦点位置に収束させたときの遠視野像を表し

た立体座標図面である。

[図35]第4実施例の光制御システムを示すブロック図である。

[図36]第5実施例の光制御システムの例を示すブロック図である。

[図37]図36のシステムにおいて空間光位相変調素子を用いた例を示すブロック図である。

[図38]第5実施例における別例を示すブロック図である。

[図39]図38のシステムにおいて空間光位相変調素子を用いた例を示すブロック図である。

[図40]第6実施例におけるレーザプラズマ電子温度変化の概念図を示す。

[図41]超解像走査型レーザ蛍光顕微鏡(STED)のメカニズムを説明する図面である。

[図42]第7実施例のSTEDの構成を示すブロック図である。

発明を実施するための最良の形態

[0069] 以下実施例を用いて本発明を詳細に説明する。

## 実施例 1

[0070] 本実施例の光制御装置は、複数の波長成分を含む直線偏光を入射し、旋光分散素子に透過させて波長成分毎の偏光面回転角を変えた後、検光子を通し、さらに、液晶などの偏光面回転子から成る空間光変調素子5を設けて、波長別に異なった空間光強度分布を有する光を得るようにした光制御装置11からなる。

[0071] 図1に示した光制御装置11は、波長分散型旋光子3、入射光の偏光面に任意の回転角空間分布を与えることができる空間光変調素子5、および検光子7を備える。

[0072] 本実施例に用いる検光子7は、特定の方向の偏光成分を選択的に透過させる光学素子であり、代表的なものとして偏光板や偏光ビームスプリッターがある。検光子7は旋光分散素子3により形成された偏光面回転角に基づいて出射光に空間光強度分布を与える機能を有する。

[0073] 旋光分散素子3は、入射光1の偏光面を回転させる素子で、波長によって回転角が異なるものである。水晶やコレステリック液晶など自然旋光材料からなる旋光子を用いても良いが、旋光角が大きく、また旋光に伴う波長分散が大きいので、ファラデー



回転子を用いることが好ましい。ファラデー回転子は光軸に平行な方向に磁場を印加することにより磁場強度に比例した旋光特性が現れ、調整が簡単である。回転子の材料が磁性体であるときは磁場の代わりに磁化に比例することになる。本実施例では、波長についての旋光角偏差が特に大きい磁性材料であるビスマス鉄ガーネット( $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ )を利用する。

[0074] 図2は、横軸に波長、縦軸に旋光回転角を取って、飽和磁化状態におけるビスマス鉄ガーネットの旋光回転角の波長分散係数を示す図面である。ビスマス鉄ガーネットを使用したファラデー回転子は、波長分散係数およびファラデー回転係数が大きいので、光の透過距離が短くて済み、より小型の素子を使用して構成することができるので、光の透過損失を小さくすることができる。例えば、飽和磁化状態のビスマス鉄ガーネット結晶中で、波長帯域700nm〜800nmの光を磁場方向に進ませると上端と下端では偏光面方向の偏差が1cm当り約18000°にも達する。従って上記結晶の厚みを50  $\mu\text{m}$ にすると、旋光角分散の大きさがちょうど90°程度になる。

[0075] 本実施例に用いる空間光変調素子5は、多数の区画に分割されていて、それぞれの区画毎に直線偏光の偏光面に独立した任意の回転を与えるように構成された空間光変調素子である。代表的なものに、ネマティック液晶の捻れネマティック(TN)効果を利用したTN液晶がある。

[0076] TN液晶の基本構成は、1対の透明電極の間にネマティック液晶を10  $\mu\text{m}$ 程度の厚さにサンドイッチしたもので、透明電極間に加える印加電圧の大きさを変えて透過する直線偏光に与える旋光角を調節する。

[0077] 図3はTN液晶における入射直線偏光の旋光回転角度の電圧依存性を示す。電極間に3Vから8Vの電圧を印加することにより旋光回転角を90°から0°の間で調整することができる。したがって、空間光変調素子5は2次元空間上にマトリックス状に配置されたセルごとに独立に透過光に与える旋光角を設定することができる。

[0078] こうして、空間光変調素子5により、直線偏光が入射する2次元空間上に任意の旋光角回転パターンを設定することができる。

[0079] 図4は、このようにして設定する旋光角回転パターンの典型的な例を示す図面である。図4(a)は2次元空間中のあるセルについて透過する光の偏光面を90°回転さ

せ、その他のセルでは回転させないようにしたときの2値化分布の例を示す図面であり、図4(b)は中心に近いほど回転角を大きくし外側に近いほど回転角が小さくなるようにした、中間調分布の例を示す図面である。これらのパターンは各セルの印加電圧を調整することにより自由に設定することができる。

[0080] 図1の光制御装置11では、複数の波長成分から成る直線偏光の入射光1を波長分散型旋光子3に透過させ波長成分毎に異なった偏光面回転角を与えた後、空間光変調素子5に照射する。空間光変調素子5は、入射面上の各セルごとに偏光面の回転角が設定されているので、セルに入射する複数の波長成分を含んだ各波長成分ごとの直線偏光4にはさらに空間光変調素子5による偏光回転角が加算される。空間光変調素子5を出射した光のうち検光子7の透過偏光面角度に平行な偏光成分だけが検光子7を透過して出射光8として光制御装置11の外に取り出される。

[0081] たとえば青、緑、赤の3波長成分を含む直線偏光1に対して、旋光子3を通して色ごとに偏光面の傾きに差異を与えた後に、空間光変調素子5に入射すると、空間光変調素子5は区画ごとに独立に旋光角を与えることができるので、それぞれの区画で青と緑と赤のいずれかを選択してその波長成分について偏光面角度に適合する旋光角を設定することにより、たとえば図5に示すように、各色成分がそれぞれ異なる2次元形状を持つようにすることができる。

[0082] ただし、検光子7は透過偏光面角度に平行な成分を透過させるので、空間光変調素子5が対象とする偏光面の傾きに対して偏光面が直交していない限り幾分かの成分が検光子7を透過する。図5に例示した関係では、青と赤の偏光角が互いに直交するので検光子により互いの光成分を完全に分離することが可能であるが、緑の成分は青や赤に対して45°の偏光面角度差があるので、赤および青に関して互いに完全に分離できない漏れ成分を有する。

[0083] 空間光変調素子5は、多数の区画に分割されていて、それぞれの区画毎に直線偏光の偏光面に独立した任意の回転を与えるように構成されているので、各区画毎の透明電極間に印加する電圧を調整することにより、また波長分散型旋光子3による波長分散角を調整することにより、多数の波長成分毎に様々な空間光強度分布のパターンを作り出すことができる。

- [0084] 図6は、上記光制御装置において、空間光変調素子5によって波長成分毎の空間光強度を制御する場合の手法概念を説明するブロック図である。
- [0085] 各種センサ21で検出した圧力、温度、特定波長の光強度などの対象物の状況を表わす信号は、制御装置22に伝送される。制御装置22において検出信号23の内容を判断して生成した制御信号24を空間光変調素子5の駆動装置に発信する。空間光変調素子5は制御信号24にしたがって旋光角の大きさを調整する。
- [0086] 空間光変調素子5は一様な2次元空間分布を有する単一素子であってもよく、また多数の区画に分割されてそれぞれの区画で旋光回転角を独立に調整可能な素子であってもよい。空間光変調素子5が単一素子で構成される場合は光制御装置11の出射光8は光強度および色調が空間的に一様であり、また多数の区画に分割された素子である場合は光制御装置11の出射光8に波長毎の異なる光強度空間分布および色調の空間分布を与えることが可能である。
- [0087] なお、この光制御装置11では、旋光子3で波長ごとに異なる偏光角を与えれば、空間光変調素子5により検光子7を透過する波長ごとの偏光角成分の割合を変化させて、出射光8の色調や波長成分ごとの光強度を調整することができるので、旋光子3は使用に際して旋光角を調整するような複雑なものではなく、予め、磁化強度や素子の厚みなどを選択して固定したものであってもよい。
- [0088] 例えば、入射光として青と緑と赤の成分を含む直線偏光を使用する場合に、青と赤の旋光角の波長分散(旋光回転角の差)の大きさを $90^\circ$ とし、その中間色である緑の旋光角の波長分散の大きさを中間の $45^\circ$ とすることができる。すると、たとえば空間光変調素子11の各区画における旋光回転角を $90^\circ$ の差が生じるように設定したとすれば、入射した赤と青の直線偏光成分が出射するときの光の空間光強度分布は互いに反転したパターンとなり、また中間色の緑は一様な空間分布となる。
- [0089] しかし、波長分散型旋光子3の波長分散角の大きさや空間光変調素子5の各区画毎の偏光回転角は任意に設定することができるので、実際の利用に際しては、光制御装置11に入射する光のパワースペクトルおよび各波長毎の位相の調整を考慮に入れた上で、利用目的に合わせて各波長毎の空間強度分布の最適な組み合わせを選定することができる。

- [0090] また、光制御装置11は、複数の波長成分から成る直線偏光を入射光1として、波長による旋光分散特性を有する旋光子3に透過させ、波長毎の偏光面回転角を変えた後、液晶などの偏光面回転子から成る空間光変調素子5を透過させ、波長毎に空間強度分布の異なった出射光8を得られるようにしたものである。
- [0091] 図7は、図1の構成において、旋光子3の前に偏光子6を付加したときの光制御装置12の作用を模式的に説明する図面である。各種レーザを用いた直線偏光1の代わりに、任意の偏光入射光2を使用したときにも、入射光2が光制御装置12内の偏光子6に入射すると任意偏光成分の内特定の直線偏光成分のみ透過するので、後は図8に表示したメカニズムにより、検光子7通過後の各波長成分毎の空間強度の異なった出射光8が得られる。
- [0092] 上記各実施形態の光制御装置11はいずれも、偏光子6を利用することにより、極めて自由に入射光を選択することができるようになり、普通の白熱灯や蛍光灯からの光や、エレクトロルミネッセンスや発光ダイオードから出射された光などを利用することができる。
- [0093] また光源のスペクトルは白色光などの連続スペクトルや各種輝線スペクトル、赤、緑、青の光の三原色であってもよい。さらに、入射光はコヒーレント光、インコヒーレント光および部分コヒーレント光のいずれであってもよい。
- [0094] 本実施例の光制御装置によって生成した光は、波長成分ごとに異なる空間パターンおよび光強度分布を持たせることができ、しかもこれらパターンや光強度分布は簡単にかつ連続的に制御することができる。
- [0095] したがって、本実施例の光制御装置は、広告塔、展示場、舞台、噴水、飲食店、商店、遊技機、工場や発電所の制御装置、自動車、鉄道、船舶、航空機などの交通手段、などにおける各種照明、または各種表示用光源として利用することができる。
- [0096] また、光制御装置の出力位置における出射光を直接観察することによる利用に加えて、さらに集光光学系を用いて焦点に収束することにより、エネルギーの時間的空間的分布を利用することもできる。
- [0097] 光制御装置の出力面には、各波長成分ごとに異なる空間光強度分布を有する光が現れ、近視野像が形成される。光制御装置の出力光は、フレネルホイヘンスの原



理により、空間光変調素子5を透過した点から放射された光波が伝搬・干渉して、所定の到達面において近視野像に対応した光強度分布、すなわち遠視野像を形成する。この遠視野像は、到達面における光エネルギーの作用を表す。

[0098] したがって、近視野像と遠視野像の関係を把握して、所望の遠視野像に対応する近視野像を形成するように光学素子を調整すれば、作用点において希望のエネルギー分布を得ることができる。

[0099] 近視野像と遠視野像の関係はシミュレーションによっても確認することができる。

[0100] 図9から図18は、偏光面回転角空間分布を制御する場合における近視野像と遠視野像の関係をシミュレーションで求めた結果の一部を示す図面である。

[0101] シミュレーションでは、一様な光強度分布を持った直線偏光入射光が直径2cmの円形開口を透過して入射するものとし、1辺が2cmの領域を100×100の区画に等分割して演算した。

[0102] また、直線偏光の偏光角は演算領域の1辺に平行な軸を基準として決められ、旋光子による波長ごとの旋光分散により生じる。

[0103] 図9から図16は、光制御装置の出力面における光強度が基準とする特定の偏光角に関してガウス分布となるようにした空間光変調方法を用いた場合の関係例を示している。

[0104] ここで、ガウス分布関数を

$$A = \exp(-r^2/B^2)$$

とする。Aは光の振幅、rは光軸からの距離( $= (x^2 + y^2)^{1/2}$ )、Bを形状パラメータとする。なお、Bは0.5に設定した。

[0105] 偏光角が0°のときの近視野像を図9に示すような立体的なガウス分布に設定すると、図10に示すような半値幅が小さくなったガウス分布形状の遠視野像を得ることができる。

[0106] また、偏光角が45°の偏光に対して、光軸を通る面における断面が図11に示すような3次元ガウス分布を示す近視野像を形成するような設定をすると、遠視野像は図12に示したように光軸上に高い光強度ピークを有し側部に小さなピークを添えたような断面を有するガウス形状となる。

- [0107] さらに、偏光角が $90^\circ$  のときに、図13に示すように中心部が0になるような3次元ガウス分布を示すような近視野像を設定すると、遠視野像は図14に示すような光軸上にピークを有する光強度分布をもつようになる。
- [0108] 図15は、上記の近視野像の断面プロフィールを偏光角に対して連続化してプロットすることにより3次元表示したものである。これら近視野像に対応する遠視野像は、図16に示すように、偏光角が大きくなるにつれて光軸上のピークが鋭くなるような変化をすることが分かった。
- [0109] 旋光分散素子によって偏光角が波長にしたがって変化するよう構成されているので、偏光角に基づいて変化ずる近視野像を設定することは、波長によって近視野像を変化させることを意味する。こうした偏光角により変化する近視野像に基づいて得られる遠視野像もまた、波長によって変化するものとなる。
- [0110] 図17と図18はそれぞれ、入射光の偏光角が $0^\circ$  の場合に、近視野像における空間光変調が1次ベッセル関数で表現される分布を持つように設定され、これに対応したリング状の遠視野像を得るようにしたときの、近視野像と遠視野像の例を示したものである。
- [0111] ベッセル関数分布における光強度 $I$ は、 $r$ を光軸からの距離、 $\varepsilon$ を遮光板の半径パラメータ( $0 < \varepsilon < 1$ )として、
$$I = I_0 (2J_1(r) / r - \varepsilon^2 \times 2J_1(\varepsilon r) / \varepsilon r)^2$$
と表すことができる。 $J_1$ は1次のベッセル関数である。
- [0112] 図17の近視野像を形成させると、遠視野像は、図18に示すようなドーナツ形状を呈することになる。
- [0113] このように、近視野像と遠視野像の関係を予め把握することにより、適当な近視野像すなわち光制御装置の出力面における空間光強度分布を形成して、希望の遠視野像を得ることができる。こうして予め設定された所定の空間光強度分布を有する光エネルギーを対象物に照射することにより、目的の光反応を起こさせることができる。

## 実施例 2

- [0114] 本発明第2の実施例の光制御装置は、さらに波長別位相変調素子を導入することにより、波長毎に空間強度分布に加えて時間波形または波長毎の位相を調整した出

射光を得られるようにしたものである。

- [0115] 図19は本実施例の光制御装置の基本構成例を示す概念図である。図19に示した光制御装置13は、直線偏光入射光1が波長別位相変調素子17を透過することにより波長成分毎の位相を所定の関係に調整した後に、旋光分散特性を有する旋光子3を透過させ波長毎の偏光面回転角を変えてから、検光子7を透過させることにより、各波長成分毎に空間光強度と位相が異なった出射光8を生成する。
- [0116] 波長別位相変調素子17の例として、フーリエ光シンセシス光学系と呼ばれるパルス整形光学系がある。図20はフーリエ光シンセシス光学系の概念図である。
- [0117] フーリエ光シンセシス光学系は、入射側回折格子18、入射側集光光学系19、空間位置ごとに光変調ができる空間光変調素子20、出射側集光光学系19'、出射側回折格子18'を備え、空間光変調素子20を挟んで回折格子とレンズそれぞれ1対を焦点距離ずつ離して置いて4-f配置にして構成した超短光パルスのフーリエ整形系である。
- [0118] 空間光変調素子20は、透過光の光路長を制御するアレイ型液晶光変調器などを利用した、光軸に垂直な方向に分離した光成分の光路長をそれぞれ独立に調整できる素子であり、スペクトル分解された入射光の各波長成分毎の光路長を変化させて位相を所定の値に調整することができる。
- [0119] 超短光パルスなど、多波長成分が同時に重なった入射光1は入射側回折格子18で角度分散を受け、フーリエ変換配置の集光光学系19によってフーリエ変換面に伝送される。フーリエ変換面では並行ビームとして光軸に垂直な方向にスペクトル展開され空間的1次元方向に波長成分が配列されることになり、フーリエ変換面に配置された空間光変調素子5により個々の波長成分に対して位相の遅れあるいは振幅の減少が与えられる。空間光変調素子5を透過した後は、光学的逆フーリエ変換を受けて、出射側回折格子18'から出射する光パルス4は、波長ごとに位相が別々に調整され、等価的に時間域での位相変調を受けたものになっている。
- [0120] この光線は、さらに旋光子3と検光子7を透過することにより、空間光強度が調整され、最終的に時間域での位相・振幅調整を受けた出射光8として出力される。
- [0121] フーリエ光シンセシス光学系は、フェムト秒超短光パルスに対して有効に波長別に

位相調整ができる能力を備えているが、前記のAOPDFなどはフーリエ光シンセシス光学系よりももっと遅い事象であっても有効である。また簡単のため、青緑赤の3原色を含む光について説明したが、連続スペクトルを有する光でも同様に波長分離して位相変調を行えることは言うまでもない。

[0122] 図21は本実施例の光制御装置13の波長成分毎の空間光強度を制御する手法の概念図である。本実施例の光制御装置13は、各種照明・表示および各種プロセス制御等に利用することができる。各種センサ21で検出した圧力、温度、特定波長の光強度などの対象物の状況を表わす検出信号23は制御装置22に伝送され、制御装置22で検出信号23の内容に適合した制御信号24を生成して波長別位相変調素子17および旋光子3に発信する。制御信号24を受けると、波長別位相変調素子17は波長成分毎の位相を調整し、また旋光子3は旋光角の大きさを変える。

[0123] なお、旋光子3の代わりにあるいはこれに加えて検光子7の回転角度の調整を行うようにしてもよいことはいうまでもない。

[0124] 図22は、さらに、旋光子3と検光子7の間に、入射光の偏光面に任意の回転角空間分布を与えることができる空間光変調素子5を備えた、本実施例の別の態様である光制御装置15を示す概念図である。

[0125] 図22の光制御装置15では、複数の波長成分から成る直線偏光の入射光1を波長別位相変調素子17に通して波長成分ごとの位相を調整した後に、波長分散型旋光子3に透過させ波長成分毎に異なった偏光面回転角を与え、さらに空間光変調素子5に照射して空間的に入射光の偏光面回転角の空間分布を調整して、検光子7を透過する光を選択する。

[0126] このようにして、出射光8に含まれる波長成分を選択し、また波長成分ごとの光強度を調整して、出射光8の色調や光強度を適宜制御すると共に、波長成分ごとの時間的相対位置を変化させることができ、特に光エネルギーを利用する分野において極めて多様な応用が可能になる。

[0127] なお、本実施例の光制御装置13, 15においても、入射光の入射位置に偏光子を配置することによって、直線偏光に限らず任意の波長成分から成る任意の偏光を入射光として偏光子を透過させて直線偏光成分のみを抽出して利用することができるこ



とは、第1実施例の光制御装置と同様である。

- [0128] 本実施例の光制御装置13, 15では、空間光変調素子5が波長別空間光強度を変える機能を有するが、同時に波長別位相変調素子17の波長別位相変調機能を備えるため、波長毎の精密な空間光強度分布の調整と同時に時間波形も調整可能となり、数個の光学素子の組合せから構成される簡単な光学系により、いわゆる光の精密な時空制御を容易に実現することが可能となる。本光制御装置の光の精密な時空制御機能は、光を利用したプロセス制御に関して極めて有用である。

### 実施例 3

- [0129] 本発明第3の実施例の光制御装置は、空間光位相分布の制御が可能な空間光変調素子を利用して、近視野位相分布を調整することにより遠視野像を所望のものとして、レーザプロセス制御を行えるようにしたものである。
- [0130] 図23は本実施例の光制御装置の基本構成例を示す概念図である。図23に示した光制御装置51は、波長によって旋光角が変わる旋光分散素子3と空間光位相変調素子52を備えて、入射光1が旋光子3を透過した後に空間光位相変調素子52を透過するようにした光学系である。
- [0131] 空間光位相変調素子52は、光の進行軸に垂直な面を規定する直交2軸の座標軸のうち1方向の偏光成分のみの光路長を空間的に独立に変えられるようにすることにより偏光面角度が異なる光に対して空間光位相変調を受ける偏光成分と空間光位相変調を受けない偏光成分の割合が異なる出射光53を生じさせる光学素子で、たとえばネマチック液晶の屈折率異方性を利用した2次元光位相変調器によって構成することができる。ネマチック液晶は細長い分子形態をしており、分子長軸の方向に位相遅延を受ける異常光線軸を有し、これに直交する方向に位相遅延を受けない常光線軸を有する屈折率異方性を持っている。
- [0132] 2次元光位相変調器は、屈折率異方性のあるネマチック液晶分子を光軸に沿って分子軸が光軸に垂直な同一方向に平行になるように配置したネマチック液晶装置である。液晶装置の液晶は、電界が印加されないときには配向膜で定められた方向を向いている。
- [0133] 液晶層を挟む透明電極に電圧が印加されると印加電圧に対応して液晶分子軸が

光軸方向に傾き、分子軸方向に偏光した光に位相の変化を与えるが、分子軸に対して垂直の方向に偏光した光は分子軸が変化しても位相が変化しない。

[0134] 入射する直線偏光は、偏光方向に応じて分子長軸に平行な偏光成分と分子長軸に垂直な偏光成分の割合が異なるので、入射光の偏光面角度によって異なる位相遅延を生じる。また、印加電圧によっても異なる位相遅延を生じる。

[0135] そこで、空間光位相変調素子の2次元位置にそれぞれ適当な電圧を印加して所定の位相遅延パターンを形成しておいて、複数の波長成分からなる直線偏光を入射し旋光子を透過させる。すると入射光は波長ごとに異なる偏光面回転角が与えられる。この光線は位相遅延が2次元パターンとして設定された空間光位相変調素子に入射する。空間光位相変調素子を出た光線は、入射面上の位置ごとにそれぞれ独立に設定した印加電圧に従い、また、波長ごとに異なる偏光面角度に従って、それぞれ異なる位相差与えられる。

[0136] 本実施例の光制御装置51を用いて、複数の波長成分からなる直線偏光1を入射して旋光子3を透過させ、各波長成分ごとにそれぞれ独自の旋光角を有するようにした後、入射面上の部位ごとに位相変化量を調整した空間光位相変調素子52に旋光子3を透過した光4を入射させると、各波長成分ごとに偏光面の傾きが異なるので、2個の直交座標軸のうち1軸方向の偏光成分のみの光路長が空間的に独立に変えることができ、偏光面角度の異なる光に対して空間光位相変調を受ける偏光成分と空間光位相変調を受けない偏光成分の割合が異なる出射光53として出力される。

[0137] 空間光位相変調素子52の出力面には、各波長成分ごとに空間光位相変調を受けた偏光成分と空間光位相変調を受けない偏光成分の割合が異なる近視野位相分布が形成される。空間光位相変調素子52の出力光は、集光光学系で焦点面に集光することによって、焦点面に近視野位相分布に対応した光強度分布、すなわち遠視野像を形成する。この遠視野像は、焦点面における光エネルギーの作用を表す。

[0138] 図24は、集光光学系により近視野像から遠視野像が形成される原理を説明する線図である。

[0139] 集光光学系の焦点距離を $f$ とすると、焦点を中心とした半径 $f$ の球面上に近視野の光強度分布および位相分布を光軸方向に投影させることにより初期の出射光条件を

表現することができる。球面上の光は、フレネル・ホイヘンスの原理により伝搬して、焦点近傍に集光し遠視野像を形成する。

- [0140] 近視野像と遠視野像は、互いにフーリエ変換およびフーリエ逆変換の関係で結びついている。そこで、試験やシミュレーションに基づき近視野像と遠視野像の関係を把握して、好ましい遠視野像に対応するように近視野像の空間光強度分布を設定することにより、焦点位置における光強度パターンを形成することができる。
- [0141] 図25から図34は、シミュレーションにより近視野像および近視野位相分布と遠視野像の関係を確認した結果の例を示す図面である。
- [0142] 本シミュレーションでは、遠視野像の中心に穴の開いた空間光強度分布が必要な場合を想定して、近視野像において光軸の周りに1回転したときに位相が $2\pi$ あるいはその整数倍変化するように空間光位相変調素子の位相回転操作を施した、いわゆる位相回転ビームを用いている。
- [0143] 図25は、本実施例の光制御装置において、入射光が平面波であって偏光角が $0^\circ$ である場合の近視野像における光強度分布を表示した立体座標図である。入射光は、直径2cmの円形分布をしており、光強度は $1\text{W}/\text{cm}^2$ となっている。
- [0144] 図26は、入射光に与える位相回転を表示した図面である。空間光位相変調素子は、入射光に対して光軸の周りに $2\pi$ の位相回転を与えている。
- [0145] 図27は、図25の近視野像に対応する遠視野像の光強度分布を表示した立体座標図、図28はその遠視野像を軸を通る面で切った断面図である。遠視野像は、光軸位置で光強度が低下し、光軸を巡り軸から離れて壁ができたドーナツ形状を呈している。
- [0146] 図29は、入射光の偏光角が $20^\circ$ のときの遠視野像の断面図である。偏光角が異なるため、光軸上の窪みが小さくなっている。図30は、入射光の偏光面が $90^\circ$ であるときの遠視野像断面形状を表す図面である。光軸状の窪みはなくなって、かなり鋭いピークを示している。
- [0147] 図31は、近視野像の対称軸に関する光強度分布断面形状を、偏光角をパラメータとして表示した立体座標図である。近視野像の光強度は、動径方向の距離にもまた偏光角の大きさにも影響されず、同じ値を有するように設定する。

- [0148] 図32は、図31に対応して、偏光角をパラメータとして遠視野像の光強度分布を表示した立体座標図である。光強度が同じ場合でも、偏光角が小さい間は光軸上に窪みを持ったドーナツ状の光強度分布をしており、偏光角が大きくなると光軸上に突出したピークが現れ、偏光角が大きくなるにつれてピークが鋭くなることが分かる。
- [0149] また、図33は、いわゆる位相回転ビームにおいて、ガウス関数分布型の近視野像を入射光の偏光角を1軸とした立体座標上に表した図面である。
- [0150] 図34は、図33の近視野像を集光光学系で焦点位置に収束させたときの遠視野像を表した立体座標図面である。入射光が一様な強度分布の光であるときとよく似た遠視野像光強度分布変化状態になるが、一様な強度分布の光の場合と比較すると、ガウス関数分布型の近視野像では壁の高さが小さくなり、また光強度ピークの値が小さくなることが分かる。
- [0151] このように、偏光角によって異なる光強度パターンを設定することができるので、複数の波長成分を含む直線偏光を入射光として使用して、いろいろな光エネルギーパターンを形成させて、たとえばレーザプロセス制御など光出力制御の自由度を高めることができる。
- [0152] 空間光位相変調素子を用いるときは、出射光を検光子に通さないで遠視野像の空間光強度分布を制御することが可能なので、光を減衰させずに効率よく光エネルギーを利用することができる。
- [0153] なお、旋光子の前に偏光子を配置すれば、旋光子に入射する光線の偏光面を選択することができるので、直線偏光でない光線を使っても同様の効果を得ることができる。
- [0154] また図示はしないが、空間光位相変調素子や旋光子を制御する機構は、第1実施例における制御装置などと同様であって、各種センサにより外部条件を取り込み、これを判断して適正な操作信号を空間光位相変調素子あるいは旋光子に伝送して、所望の光出力を行う。
- [0155] 本実施例で得られる光パルスの時間空間構造の制御を施した多波長成分を含有するレーザパルスを物質に照射して、熔融や蒸発などの熱反応、原子核反応、プラズマ反応、化学反応、同位体分離、蛍光発生などのプロセスを生起させることができ



る。こうしたプロセスにより、レーザ加工、化学物質や元素の合成、分解、分離などや、原子、分子、イオン、電子、陽電子、中性子、クラスターなどの粒子生成や、X線、 $\gamma$ 線などの電磁波の発生や、蛍光の発生・制御を行なわせることができる。

[0156] これらの技術は、半導体、化学、エネルギー、医療、機械などの産業分野や、粒子加速器や生体物質の検査などの基礎研究などへの応用が期待されている。

#### 実施例 4

[0157] 上記各実施例の光制御装置は、図35から図39に示す通り、いろいろな光源について使用することができる。具体的な例として、本発明の光制御装置をレーザプラズマX線発生に適用した実施例を説明する。

[0158] レーザプラズマX線は短パルス高強度レーザを金属などのターゲットに照射した場合に発生する。レーザプラズマからX線が発生するメカニズムを以下に述べる。レーザがターゲットを照射したとき、照射されたターゲット部分はプラズマ化するが、そのときレーザの大部分のエネルギーは最初にプラズマ中の電子が吸収する。したがって、レーザ照射後のプラズマ中には高温の電子と低温のイオンが共存しており、高温の電子はイオンの内殻電子を励起する。励起された内殻電子が下準位に緩和するとき準位差に相当する波長のX線が放出される。電子がイオンの内殻電子を励起するのに十分な温度を保持している間はプラズマはX線の放出を続ける。

[0159] 通常プラズマ中の電子は局所熱平衡状態にあり、電子の状態分布はボルツマン分布で近似することができる。電子温度が高すぎると内殻電子を励起するのに必要以上のエネルギーを持った電子が増加して特定波長のX線が発生するのに適さない状態となり、一方、電子温度が低すぎると内殻電子を励起するのに必要なエネルギーを有する電子数が少なくなる。

[0160] したがって、ターゲット材料に対応して、内殻電子が特定波長のX線を放出するのに最も適した電子温度が存在する。特定波長のX線発生に関する最適温度が存在することを考慮すれば、レーザプラズマX線発生制御においては、最適電子温度ができるだけ長時間かつできるだけ広い範囲にわたって持続することが理想である。

[0161] 図40にレーザプラズマ電子温度の特定波長のX線発生に関する理想的時間発展を表す概念図を示す。図は、横軸に空間的広がりを表し、縦軸に照射レーザ光32の

光強度とプラズマの電子温度33を表す。図40(a)から(b)(c)の順に発展する間にプラズマ中の温度分布33がX線発生に関する最適温度レベル34を維持しながら広がっていくことが好ましい。

[0162] 本実施例のレーザプラズマX線発生装置においては、ターゲットに集光した位置におけるレーザビームの空間光強度分布パターン32は、図40(a)に示すように、先にターゲットに到達する光パルスの先頭部分が光軸の中心部にエネルギーの集中した空間光強度分布をしており、図40(b)と(c)に示すように、後からターゲットに到達する一連の光パルス空間強度分布32が、レーザプラズマの膨張に追隨して順次ビーム径が拡大しつつ中心部の光強度が弱く周辺部の光強度の強い円環状の空間分布をしていることが好ましい。

[0163] ターゲットを照射するレーザ光パルスが上記のような空間光強度分布をとることにより、より広い空間領域およびより長い時間にわたって、レーザプラズマ中の電子温度33を特定波長のX線を発生するのに適した温度レベル34に保持することができて、目的とする波長のX線を効率よく発生させることができる。

[0164] 本実施例の光制御装置により生成したレーザ光をターゲットに照射してX線を発生させるようにすれば、ターゲット位置におけるレーザ光の空間光強度分布と照射時間間隔を適宜調整することができるので、X線発生プロセスの設計を微細な点にわたって行なうことができる。本実施例の光制御装置は、従来よりもレーザプラズマ最適制御に近い制御を、従来よりもシンプルな光学系により容易に実現することを可能にし、発生させるX線の特性を精密に制御することができる。

[0165] また、X線の強度特性として波長特性を測定し、目的とする特定波長におけるX線の強度の計測値に基づいて、レーザビームの強度分布および波長毎の位相調整を行なうことができるようにしてもよい。発生させるX線は目的によって決まる適正な波長成分が多く含まれるようにすることが好ましい。また、目的とする波長のX線強度を測定して、当該波長成分の強度が大きくなるように空間強度分布および波長毎の位相を調整するようにすることができる。

## 実施例 5

[0166] 本発明の光制御装置によれば、レーザ光を変成して波長毎に空間光強度分布の

異なる所定のパターンの光として発生させることができるので、この光を蛍光抑制(STED: Stimulated Emission Depletion)方式の超解像走査型レーザ蛍光顕微鏡に適用することができる。

[0167] 図41は、超解像走査型レーザ蛍光顕微鏡(STED)のメカニズムを説明する図面である。

[0168] STEDは、通常の走査型レーザ蛍光顕微鏡の分解能を向上させたものであって、励起光43を先行パルスとして試料中の蛍光分子励起領域44に照射し、蛍光分子を励起した直後の蛍光寿命よりも十分に短い時間しか経過しないうちに、蛍光と同波長のドーナツ形状の穴明きビームである蛍光抑制光45を後続パルスとして励起光43と同軸に照射して蛍光発光を抑制して、ドーナツの穴径の大きさに残って発光する蛍光46を検出する。

[0169] STEDでは、走査スポット径を観察時に小さくできるので顕微鏡の分解能が向上する。

[0170] 従来のSTED方式レーザ蛍光顕微鏡は、超短パルスレーザを光パラメトリック増幅器(OPO)で波長を調整した後2つに分岐して、一方の光を第2高調波発生(SHG)で波長変換して蛍光励起用の光源とし、またもう一方の分岐光を蛍光抑制用のSTED光としてSHGで波長変換した蛍光励起用の光と同軸に合成していたので、複雑な光学系を必要としていた。

[0171] 図42は、蛍光抑制方式レーザ蛍光顕微鏡(STED)に本発明を適用した実施例の構成を示す図面である。

[0172] 本実施例では、本発明の光制御装置を使って、光源光に含まれる広帯域スペクトル中の、試料の蛍光と同一の波長成分を分離し遅延させて誘導放出による蛍光を抑制する蛍光抑制光45として使用し、その他の波長の光は蛍光励起光43として使用する。

[0173] STEDの蛍光抑制誘導放出光は、穴明きビームであるので、位相回転ビームを使用することが好ましい。位相回転ビームを1方向から試料に照射すると観察部に回転力が加わるので、これを相殺するため、逆方向から同時に反対方向に位相回転する位相回転ビームを照射する。

- [0174] 本発明の光制御装置から出力された出射光8は、レンズ35で平行光に変成されビームスプリッタ36で2分され、反射鏡37を組み合わせると同じ光路長を持つように形成された光路を走行して、対物レンズ38で試料39に上下2方向から集光される。
- [0175] 試料39から放出される光は光路を逆にたどってレンズ35により収束され、ダイクロイックミラー40で反射して、ピンホール41を通過して検出器42に入射する。
- [0176] 本実施例のSTED方式レーザ蛍光顕微鏡は、単一の光学系で上記蛍光励起光43と蛍光抑制光45の2種類の光を供給することが可能となり、従来方式のSTEDと比較すると構造の簡略化、装置のコスト、取り扱いの容易性など種々の点について有利である。

#### 産業上の利用可能性

- [0177] 本発明の光制御装置を用いることにより、波長別の空間光強度が連続的に変化するので、出射光の色調を多数の種類に容易に変えることができる。したがって、各種照明および各種表示用光源としてこれらの光を利用することができるので、各種産業における利用を促進する。
- [0178] また、レーザパルスの空間強度分布および時間波形を同時に連続的かつ精密に調整することができるので、レーザ反応プロセスをより高度に制御することが可能になり、各種産業における光利用を促進する。
- [0179] さらに、本発明のX線発生装置を用いれば、レーザによりプラズマを発生してX線を放出させる場合に、X線の強度調整をすることができ、特に特定波長のX線の強度を選択的に調整することができる。さらに、走査型蛍光抑制(STED: Stimulated Emission Depletion)方式の超解像顕微鏡に本発明を適用して、単一の光学系で蛍光励起光および蛍光抑制光を発生させることができるので、装置を簡素化することができる。



## 請求の範囲

- [1] 波長によって旋光角が変わる旋光分散特性を有する旋光子と、入射面全体あるいは面上の部位ごとに入射光の偏光面の旋光角を旋光回転により変えることができる空間光変調素子と、検光子とからなり、入射光が前記旋光子と前記空間光変調素子と前記検光子を順に透過するように構成した光学系を備え、
- 複数の波長成分からなる直線偏光を入射して前記旋光子を透過させ各波長成分ごとにそれぞれ独自の旋光角を有するようにした後に、部位ごとに前記波長成分の内のいずれかの偏光面の旋光角に合わせて旋光回転を調整した前記空間光変調素子に前記旋光子を透過した光を入射させて前記各波長成分ごとに偏光面旋光角を前記検光子の向きに対して所定の関係を有するように調整して、各波長成分ごとに異なる空間光強度を有する出射光として放出する
- 光制御装置。
- [2] さらに、前記旋光子の入射側位置に偏光子を備え、
- 複数の波長成分からなる任意の偏光特性を有する光を入射すると、該複数の波長成分が同じ偏光面を有する直線偏光となって前記旋光子に入射して、各波長成分毎に異なる空間光強度を与えることが可能な
- 請求項1記載の光制御装置。
- [3] 前記空間光変調素子の光軸に垂直な面が多数の区画に分割され、かつ入射光の偏光面の旋光角を区画毎に、それぞれ独立に変えることができる
- ことを特徴とする請求項1記載の光制御装置。
- [4] 前記空間光変調素子の旋光回転角の大きさまたは旋光回転角の大きさの近視野像あるいは遠視野像における分布を変えることにより、波長成分毎の空間光強度の大きさ又は波長成分毎の空間光強度の大きさの分布を変化させる
- ことを特徴とする請求項1記載の光制御装置。
- [5] 前記空間光変調素子がTN (twisted nematic) 液晶である
- ことを特徴とする請求項1記載の光制御装置。
- [6] 前記空間光変調素子を透過する光に与える偏光面の回転角が、光軸中心から径方向の外部に向かって軸対称(同心円状)に、段階的もしくは連続的な変化を与える

ことを特徴とする請求項3から5のいずれかに記載の光制御装置。

- [7] 前記空間光変調素子の空間光強度分布の制御に伴い発生する空間位相変調作用を調整する

ことを特徴とする請求項1記載の光制御装置。

- [8] 波長によって旋光角が変わる旋光分散特性を有する旋光子と、入射面全体が一様にあるいは面上の部位ごとに入射光の波面を制御し入射光の空間位相分布を調整する空間光位相変調素子とから成り、入射光が前記旋光子と前記空間光位相変調素子を順に透過するように構成した光学系を備え、

複数の波長成分からなる直線偏光を入射して前記旋光子を透過させ各波長成分ごとにそれぞれ独自の旋光角を有するようにした後に、全体を一様にあるいは部位ごとに前記波長成分に対する空間光位相変調量を調整した前記空間光位相変調素子に前記旋光子を透過した光を入射させて、前記各波長成分ごとに空間光位相変調を受ける光量の割合を調整した出射光を出射し、各波長成分ごとに異なる遠視野像を形成する

光制御装置。

- [9] 前記空間光位相変調素子が入射光の光軸に垂直な面を規定する直交座標軸のどちらか1軸の方向のみの偏光成分に関して光路長を変える2次元光位相変調器である

ことを特徴とする請求項8記載の光制御装置。

- [10] 前記空間光位相変調素子が平行配向ネマチック液晶空間光変調素子である
- ことを特徴とする請求項8記載の光制御装置。

- [11] 前記旋光子が旋光分散効果を使って入射直線偏光成分に波長ごとに異なった偏光角を与えることにより、光軸に垂直な面上の基準となる直交座標軸方向に配分した2つの偏光成分の割合が波長ごとに調整された透過光を出射し、前記空間光変調素子が該透過光を入射させて空間位相変調作用により光波面の空間形状が整形された偏光成分と該空間光変調作用が及ばず光波面の空間形状が変化しない偏光成分との割合を調整した出射光を出射する

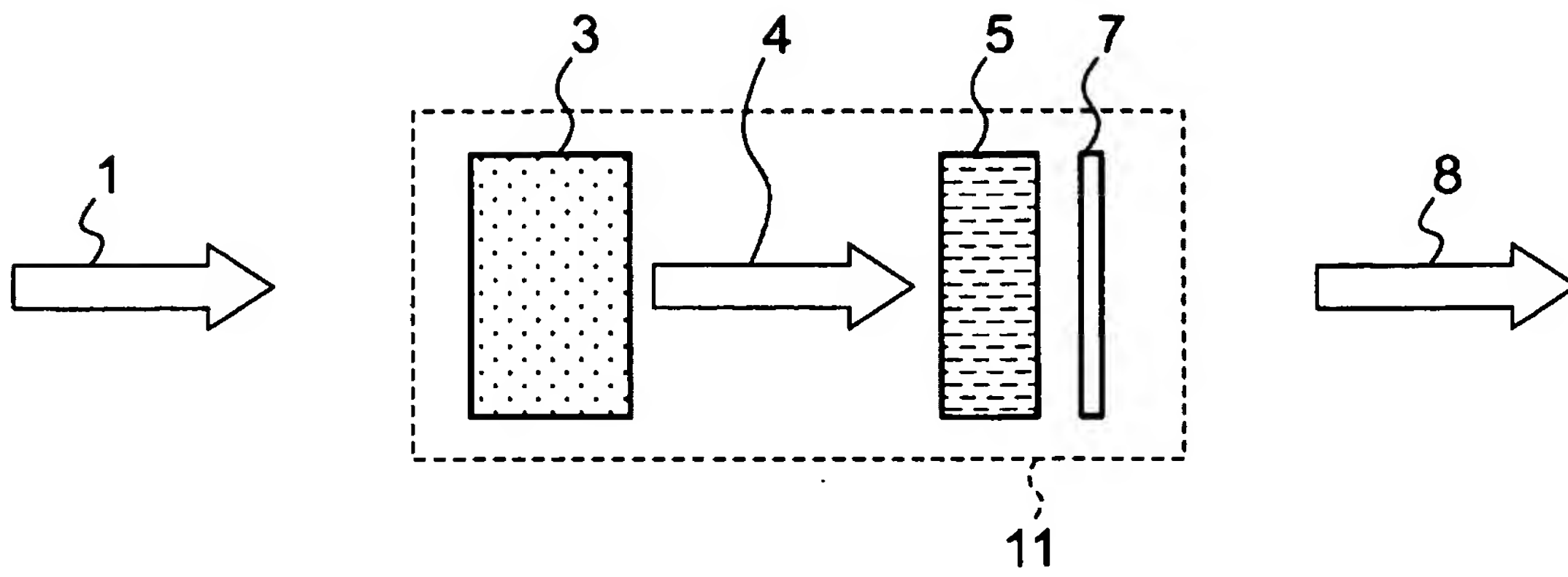
ことを特徴とする請求項8記載の光制御装置。

- [12] 前記空間光変調素子の空間位相変調作用により、出射光の空間光位相分布が螺旋階段のような形態を有し、さらに光軸周りに1周することに生ずる位相ずれの大きさが $2\pi$  radの整数倍の近傍値になる  
ことを特徴とする請求項1または8のいずれかに記載の光制御装置。
- [13] さらに、波長成分毎の光位相を調整する波長別位相変調素子を備える  
ことを特徴とする請求項1または8のいずれかに記載の光制御装置。
- [14] 前記波長別位相変調素子による波長成分毎の光位相の調整を前記旋光子又は前記空間光変調素子又は前記空間光位相変調素子の調整と同時に行うことにより、出射光の波長成分毎の位相および空間光強度分布又は空間光位相分布を同時に制御する  
ことを特徴とする請求項13記載の光制御装置。
- [15] 前記旋光子がフアラデー回転子である  
ことを特徴とする請求項1または8のいずれかに記載の光制御装置。
- [16] 前記旋光子が自然旋光材料から成る光学素子である  
ことを特徴とする請求項1または8のいずれかに記載の光制御装置。
- [17] 前記旋光子が液晶から成る光学素子である  
ことを特徴とする請求項1または8のいずれかに記載の光制御装置。
- [18] 前記旋光子を通過後の光の旋光分散角の最大値が90度となるように設定する  
ことを特徴とする請求項1または8のいずれかに記載の光制御装置。
- [19] 前記出射光の波長成分毎に空間分布の異なった複数の波長成分を組合わせた効果を利用して各種プロセス制御に利用する  
ことを特徴とする請求項1または8のいずれかに記載の光制御装置。
- [20] レーザプラズマX線発生源のターゲットに先に到達する光パルスについて先頭部分が光軸の中心部にエネルギーの集中した空間光強度分布をさせ、後からターゲットに到達する一連の光パルスについて空間光強度分布が中心部の光強度が弱く周辺部の光強度が強い円環状の空間分布をさせることにより、レーザプラズマX線発生量の制御をする  
ことを特徴とする請求項19記載の光制御装置。

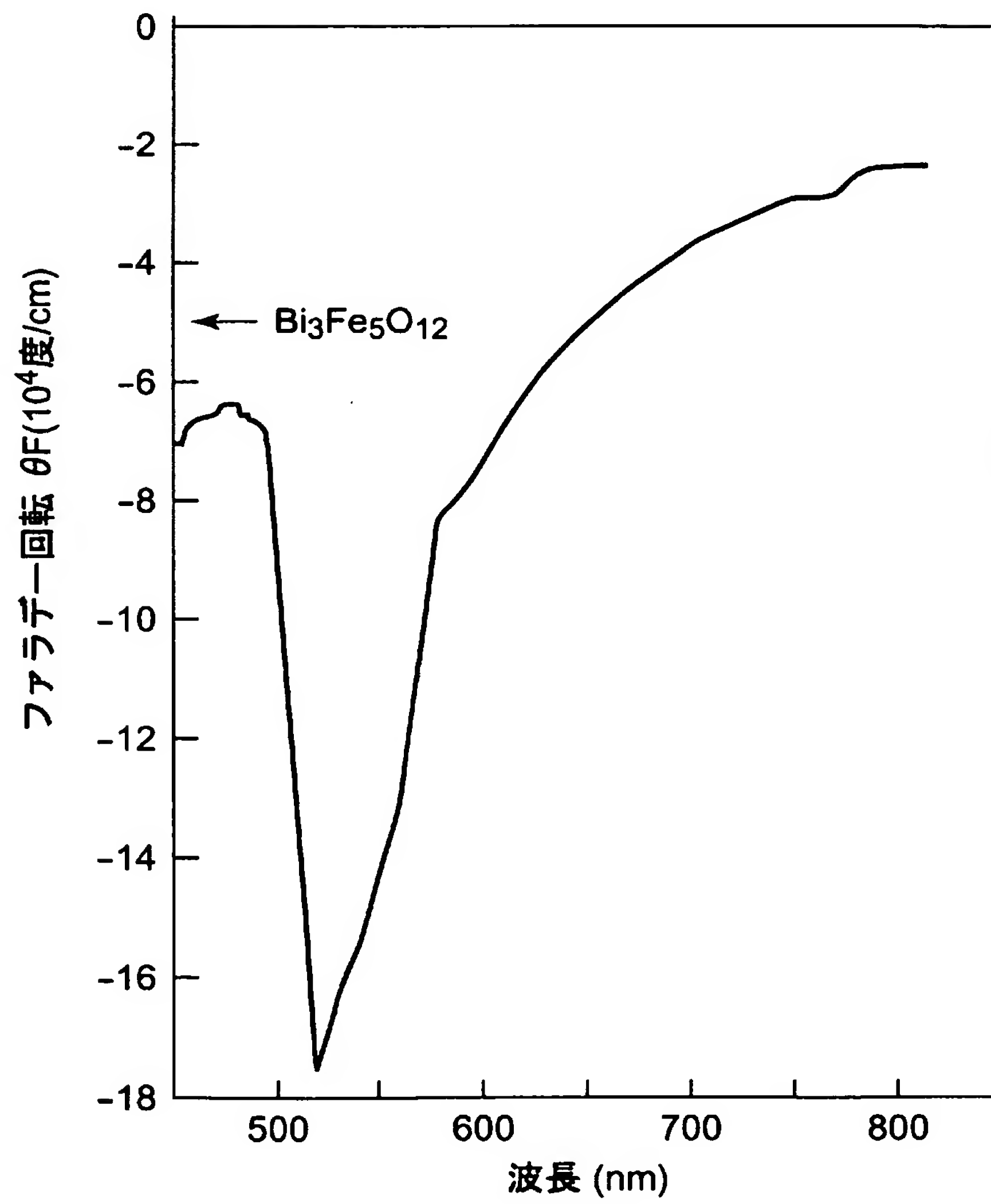
- [21] 走査型蛍光制御方式(STED: Stimulated Emission Depletion)の超解像顕微鏡において、広帯域スペクトル中の蛍光と同一波長の波長成分を誘導放出による蛍光抑制の目的に使用し、その他の波長の光は蛍光励起光として使用することにより、試料を拡大観察するようにした  
ことを特徴とする請求項19記載の光制御装置。
- [22] 旋光分散特性を有する旋光子に複数の波長成分からなる直線偏光を入射して各波長成分ごとに異なる偏光角を与え、  
旋光子透過後に空間光変調素子を透過させて入射面全体あるいは面上の部位ごとに偏光面の旋光角を変え、  
空間光変調素子通過後に検光子を透過させることにより、各波長成分ごとに空間光強度分布を制御した出射光として出射させる  
ことを特徴とする光制御方法。
- [23] 旋光分散特性を有する旋光子に複数の波長成分からなる直線偏光を入射して各波長成分ごとに異なる偏光角を与え、  
旋光子透過後に空間光位相変調素子を透過させて入射面全体あるいは面上の部位ごとに入射光の空間光位相を変えることにより、各波長成分ごとの空間光強度分布を制御した出射光を得る  
ことを特徴とする光制御方法。
- [24] さらに、波長別位相変調素子を備えて波長成分ごとの光位相を調整する  
ことを特徴とする請求項22または23記載の光制御方法。
- [25] 空間光位相分布を同時に制御する  
ことを特徴とする請求項24記載の光制御方法。
- [26] 前記波長別位相変調素子による波長成分ごとの光位相の調整を前記旋光子または前記空間光変調素子または前記空間光位相変調素子による空間光強度の調整と併せて行って、出射光の波長成分ごとの位相および空間光強度分布または空間光位相分布を同時に制御することを特徴とする請求項24記載の光制御方法。



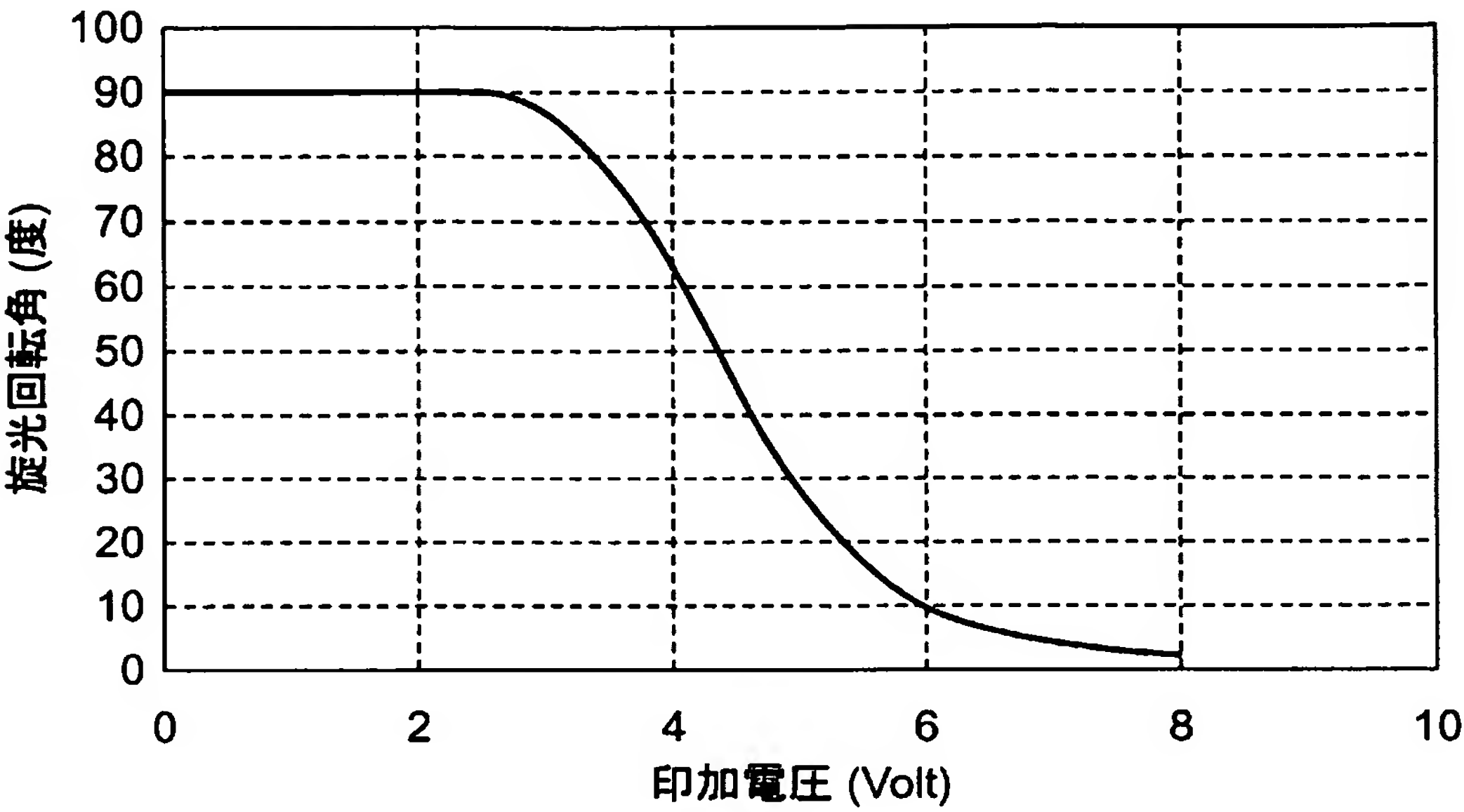
[図1]



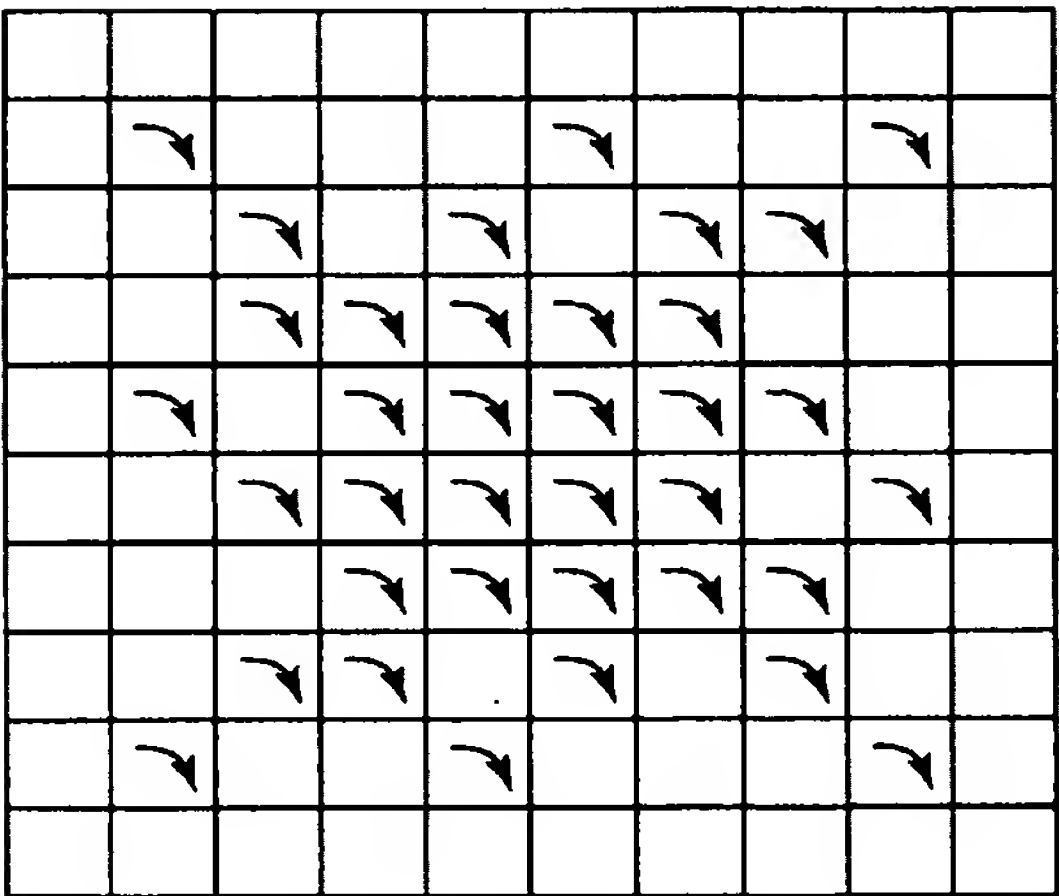
[図2]



[図3]

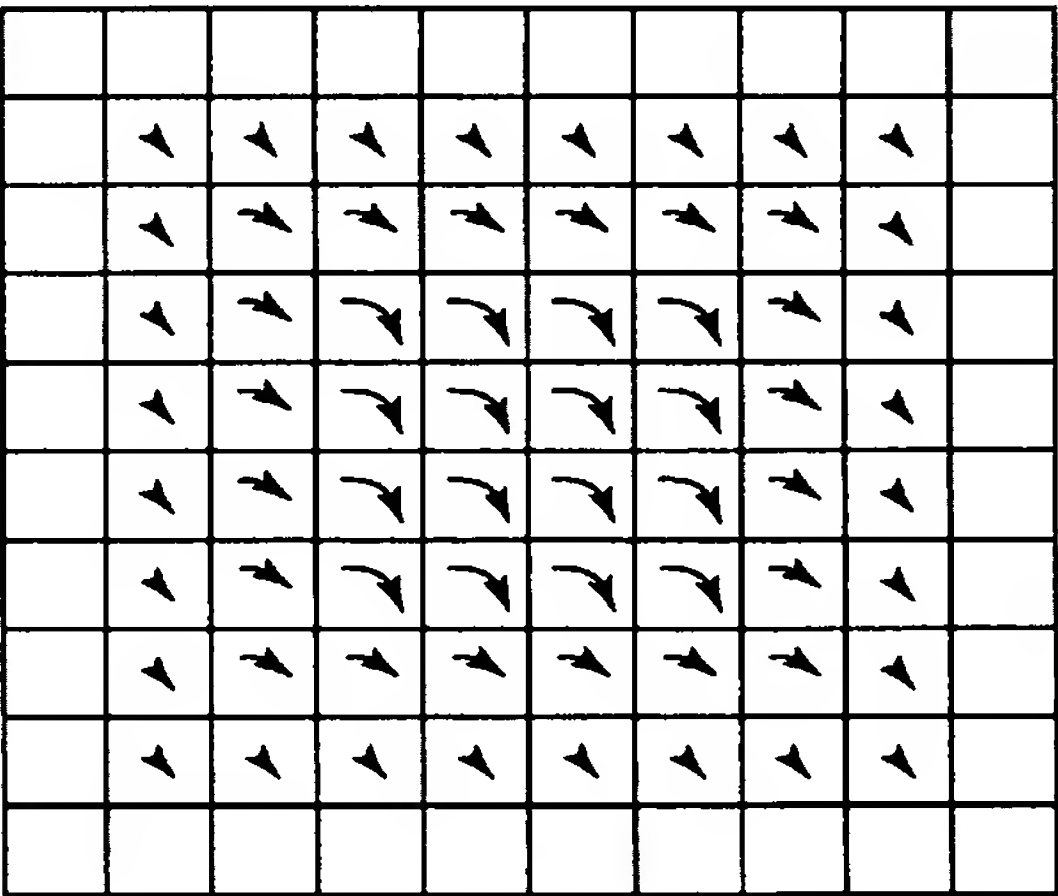


[図4]



(2値化分布)

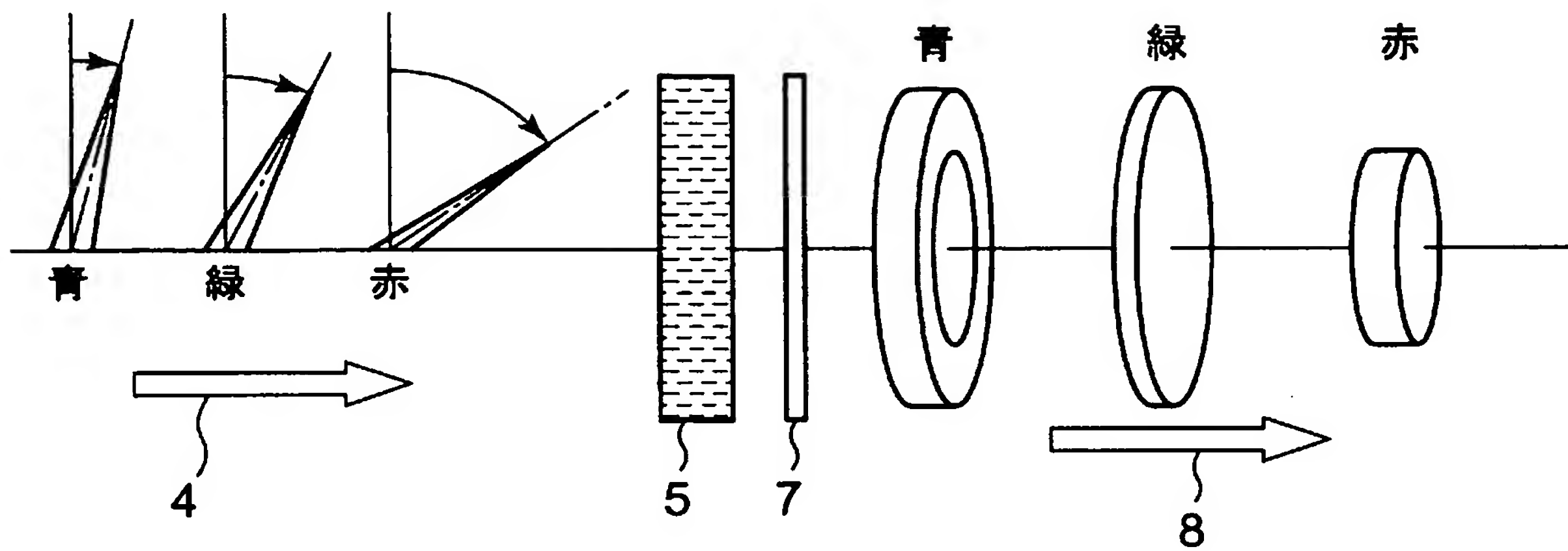
(a)



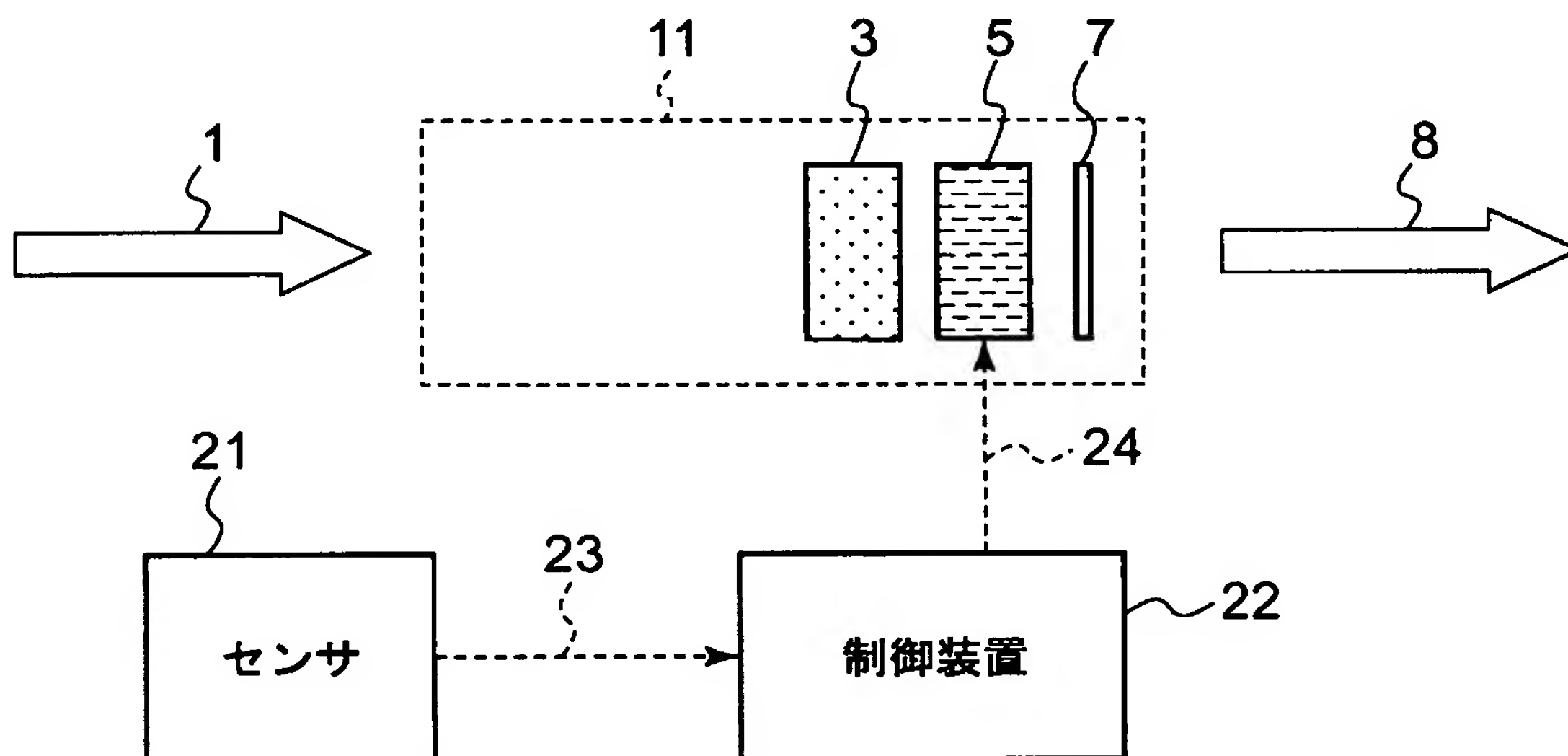
(中間調分布)

(b)

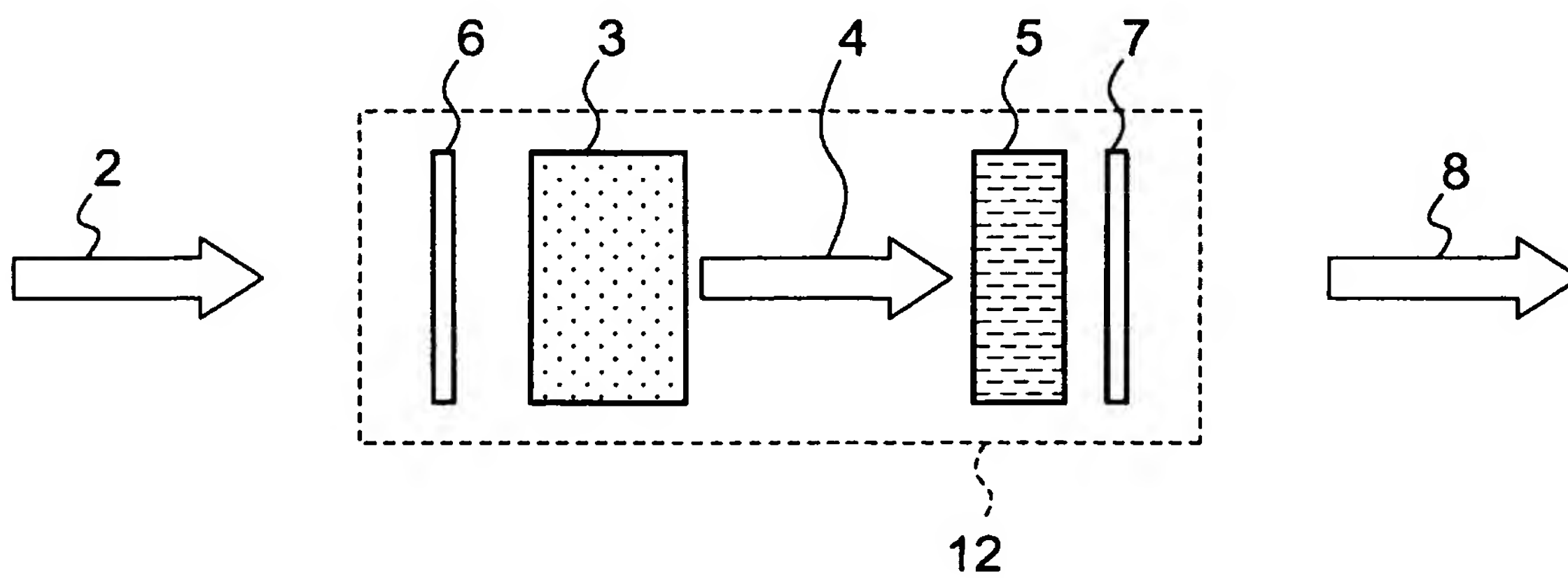
[図5]



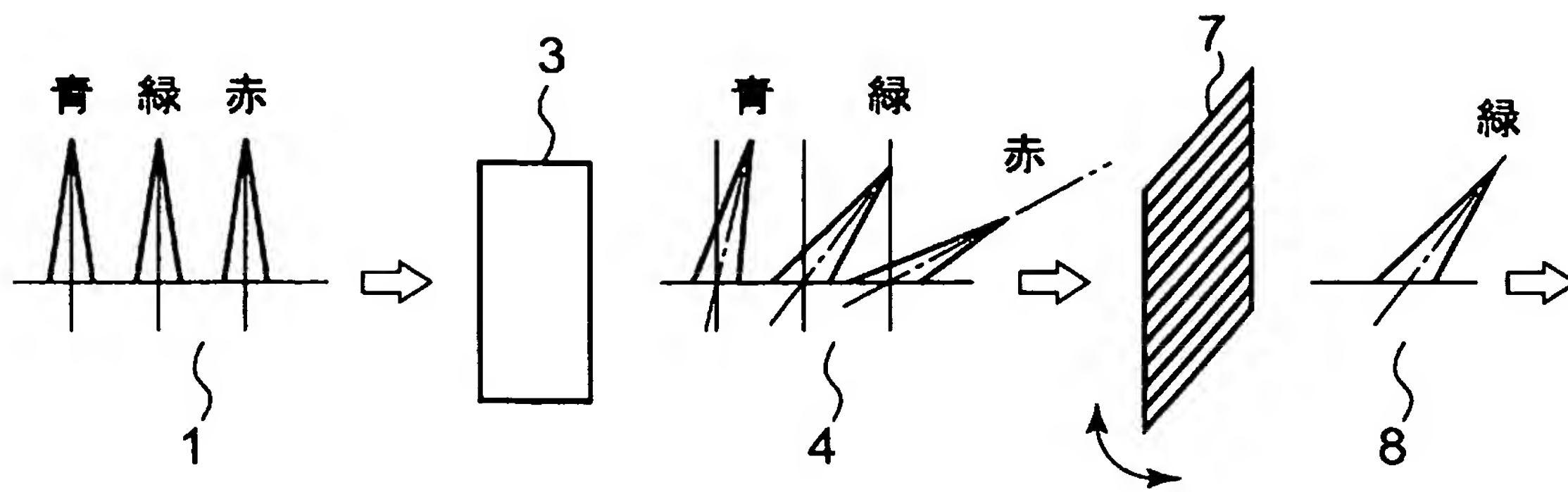
[図6]



[図7]

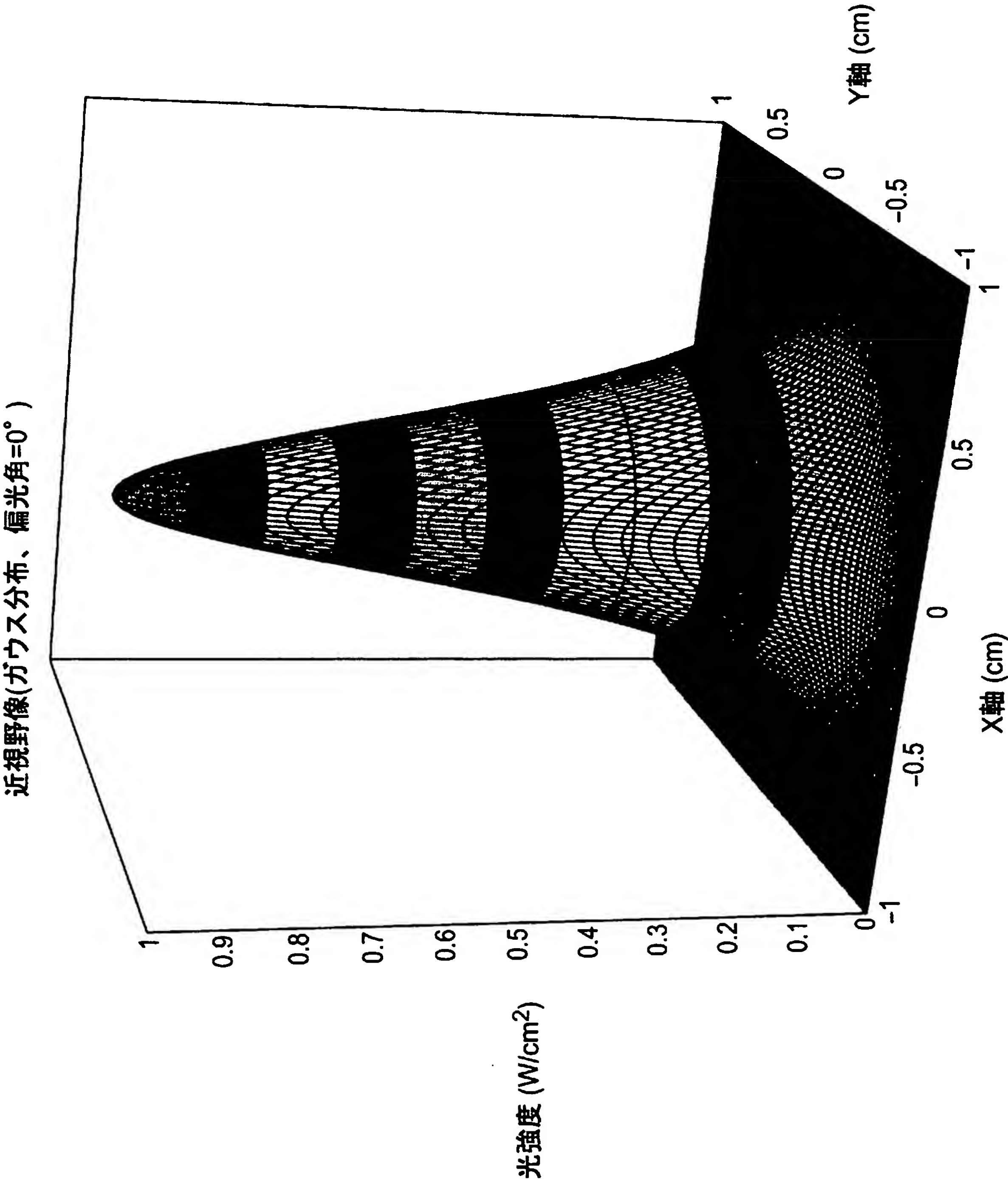


[図8]

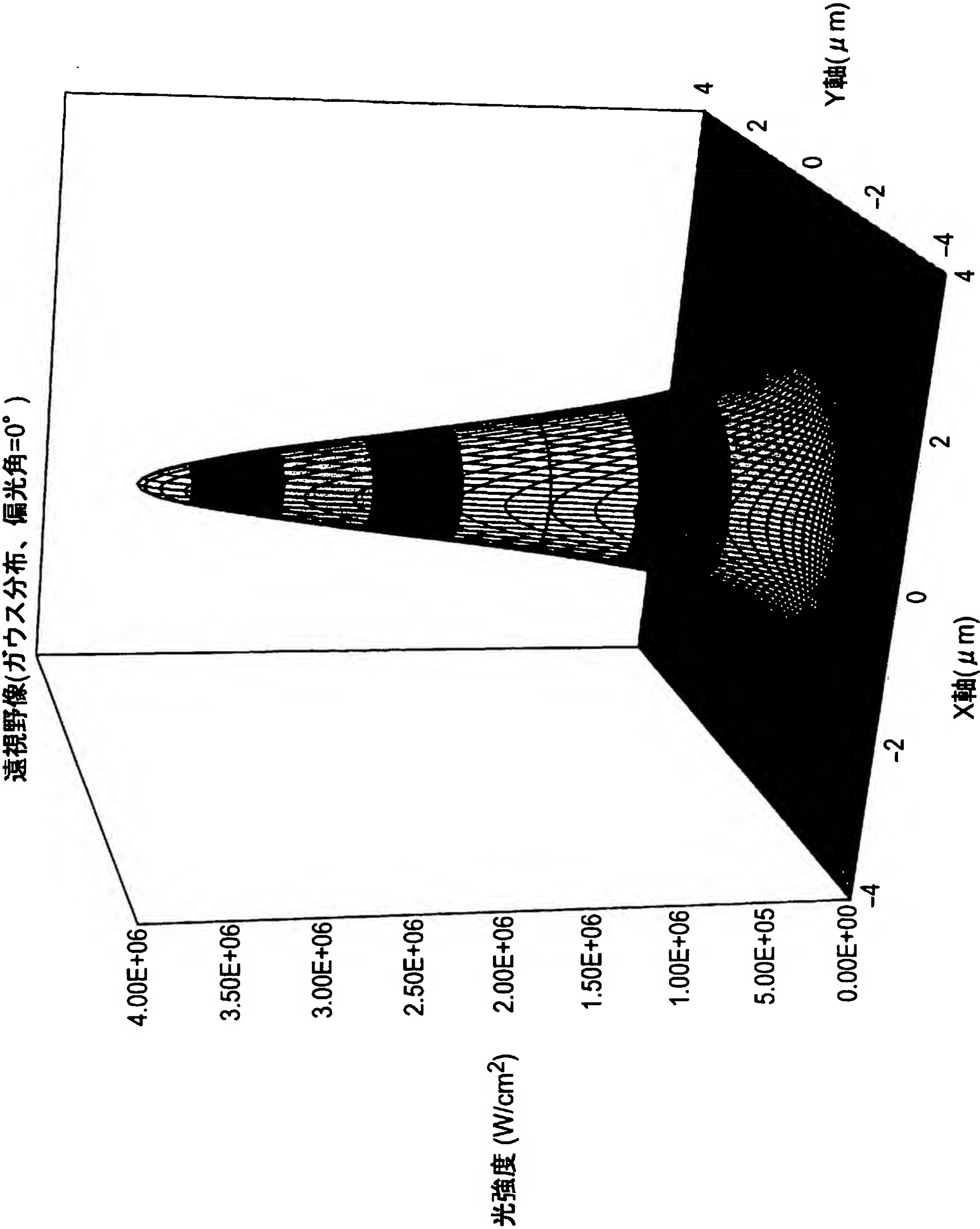




[図9]

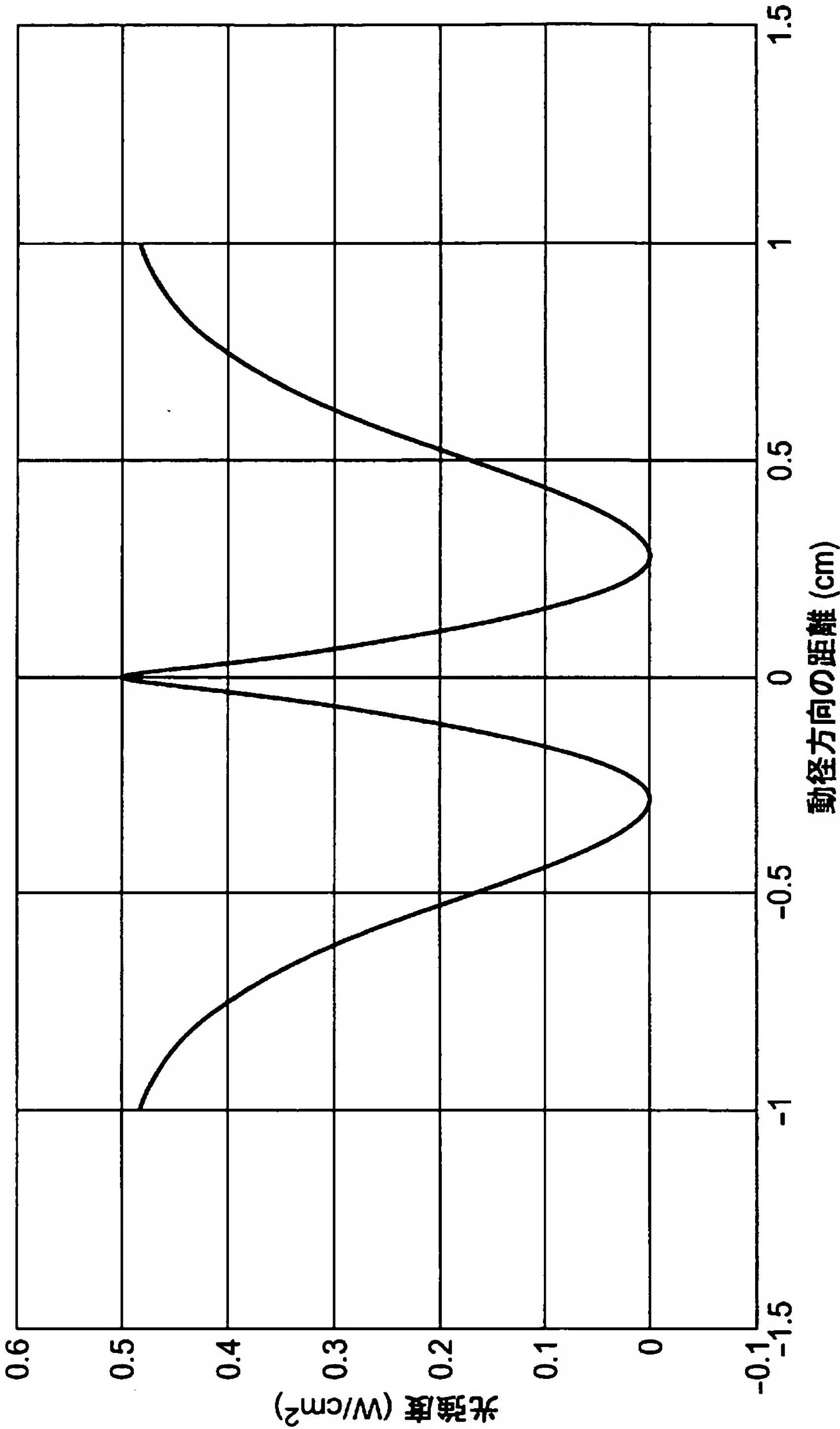


[図10]



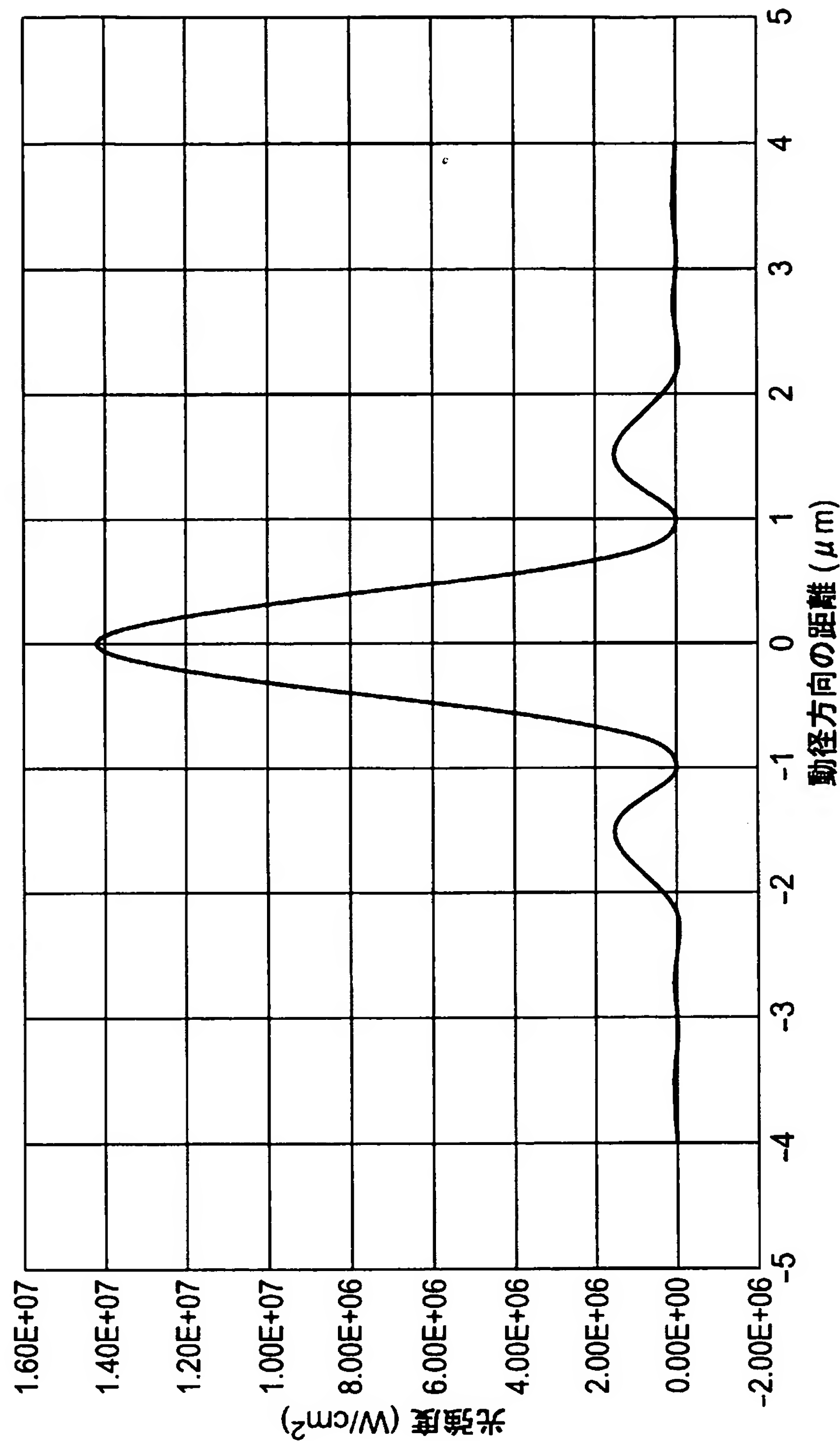
[図11]

近視野像断面形状 (ガウス分布、偏光角=45°)



[図12]

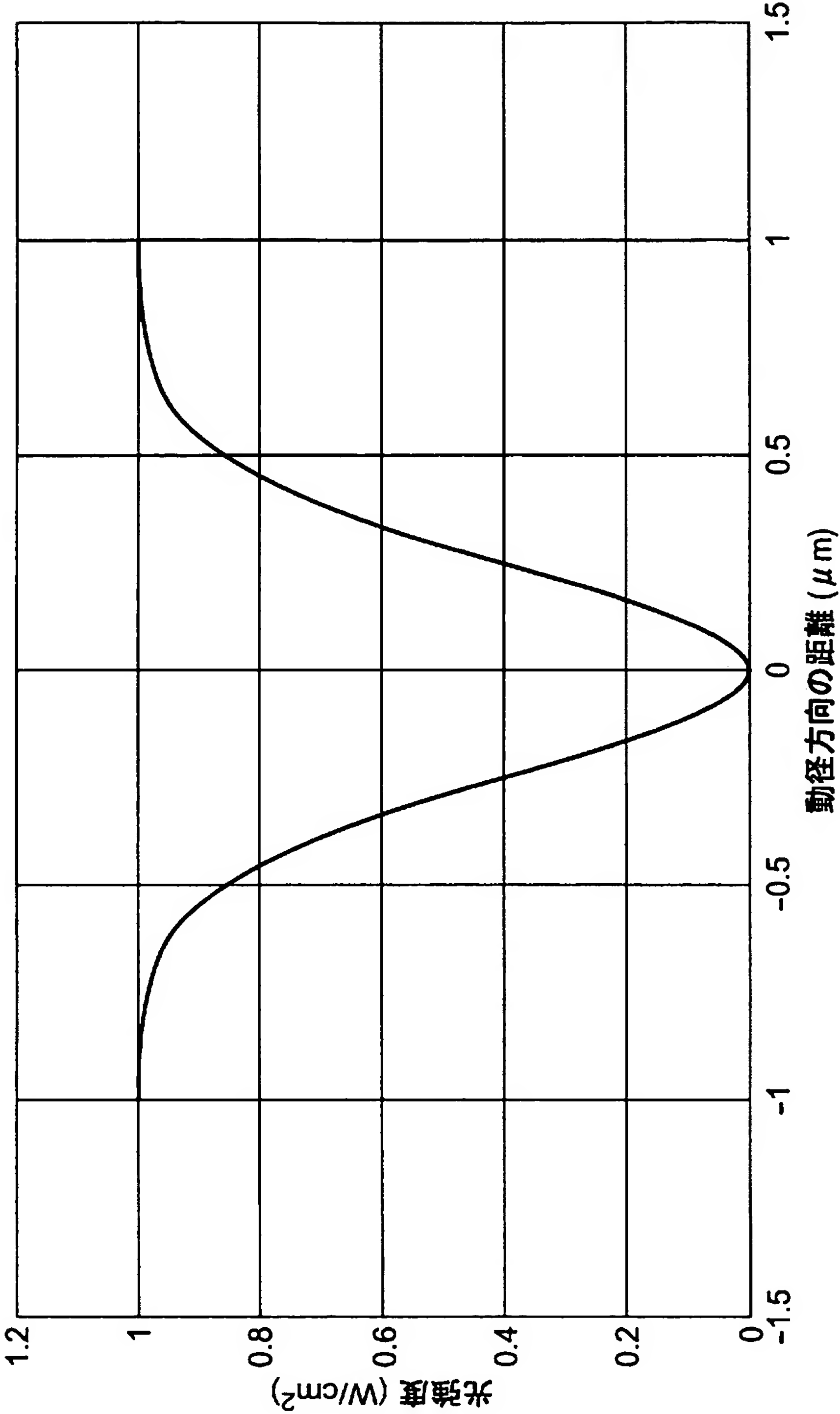
遠視野像断面形状 (ガウス分布、偏光角=45°)





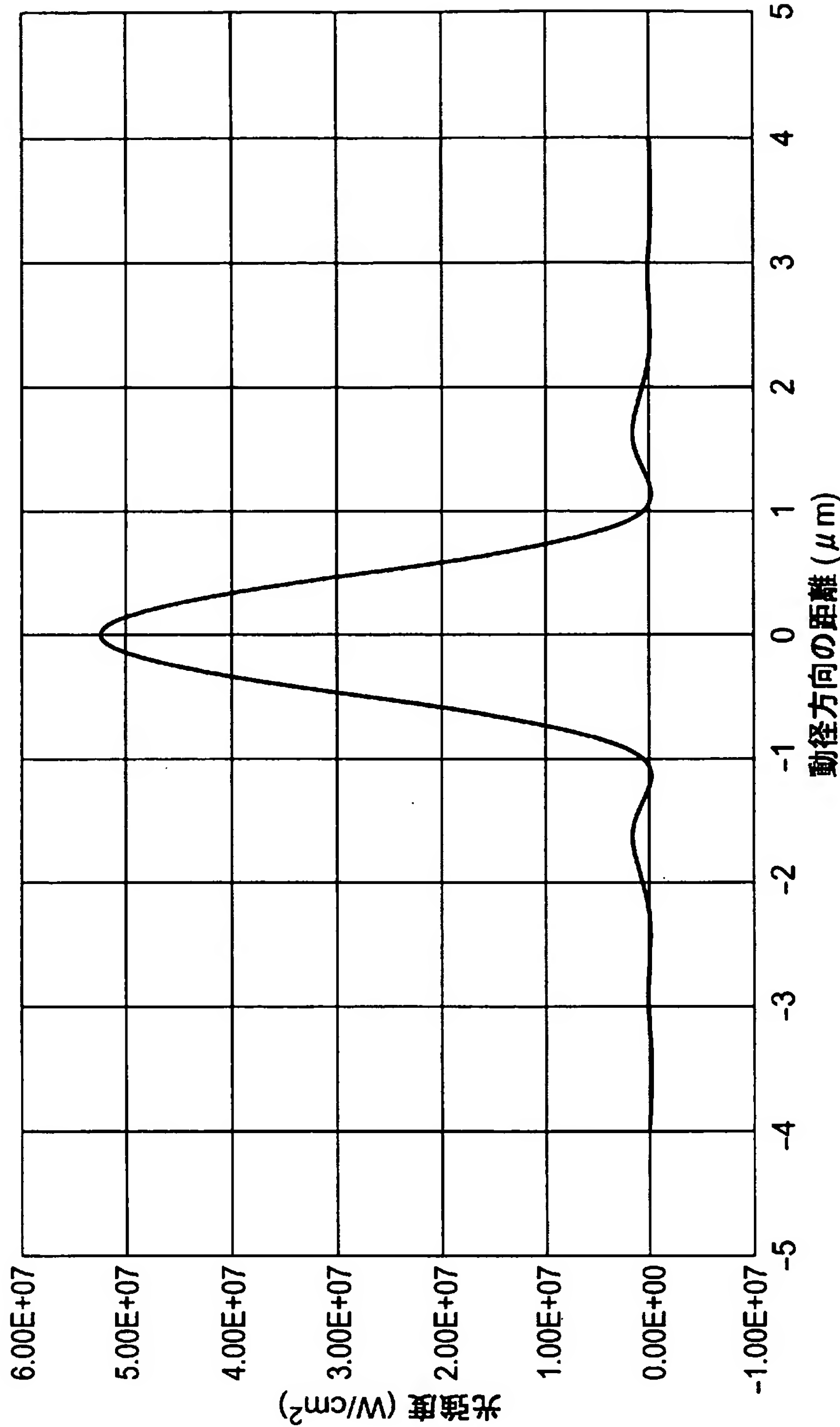
[図13]

近視野断面形状 ( ガウス分布、偏光角=90° )

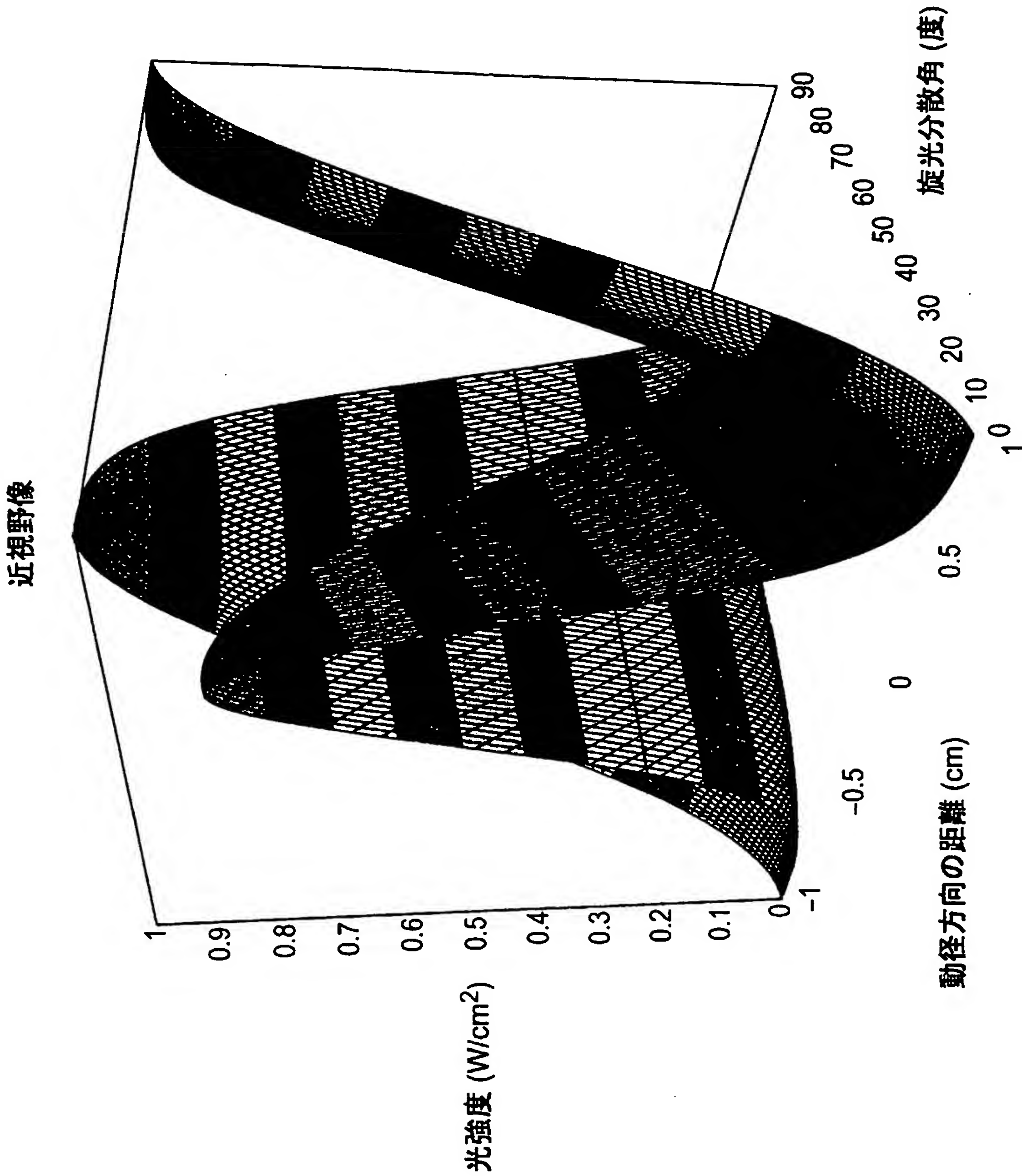


[図14]

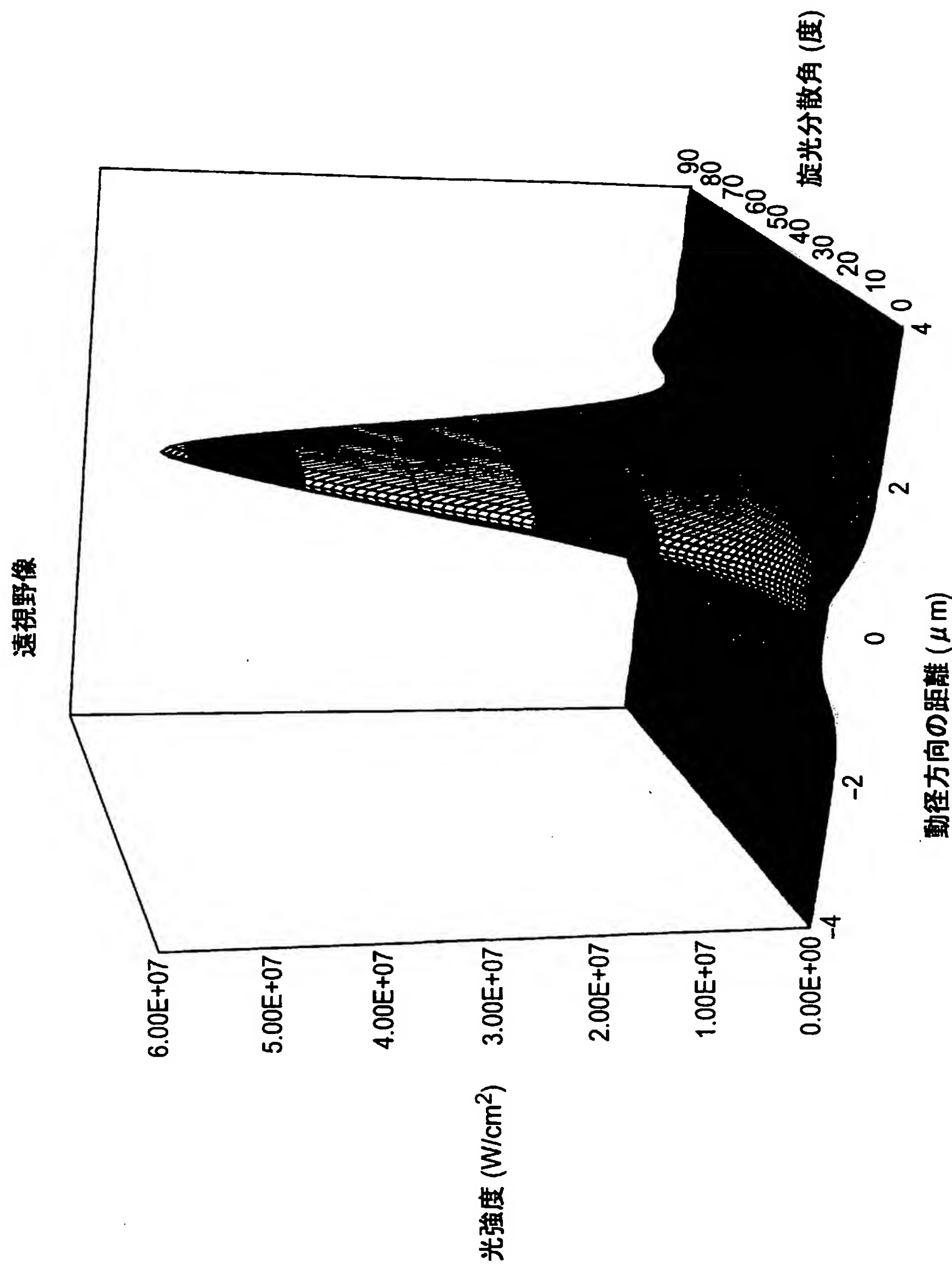
遠視野像断面形状 (ガウス分布、偏光角=90°)



[図15]

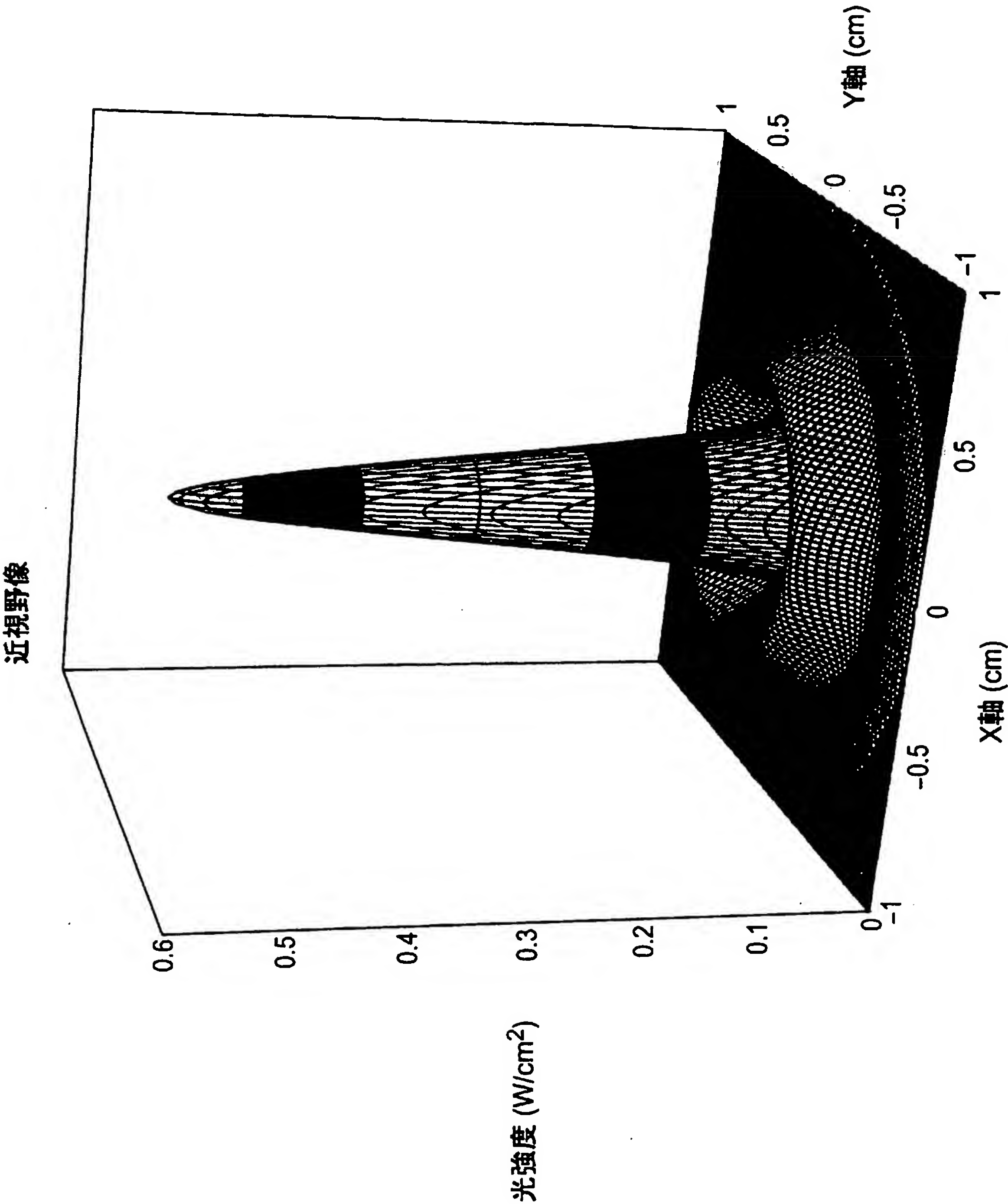


[図16]

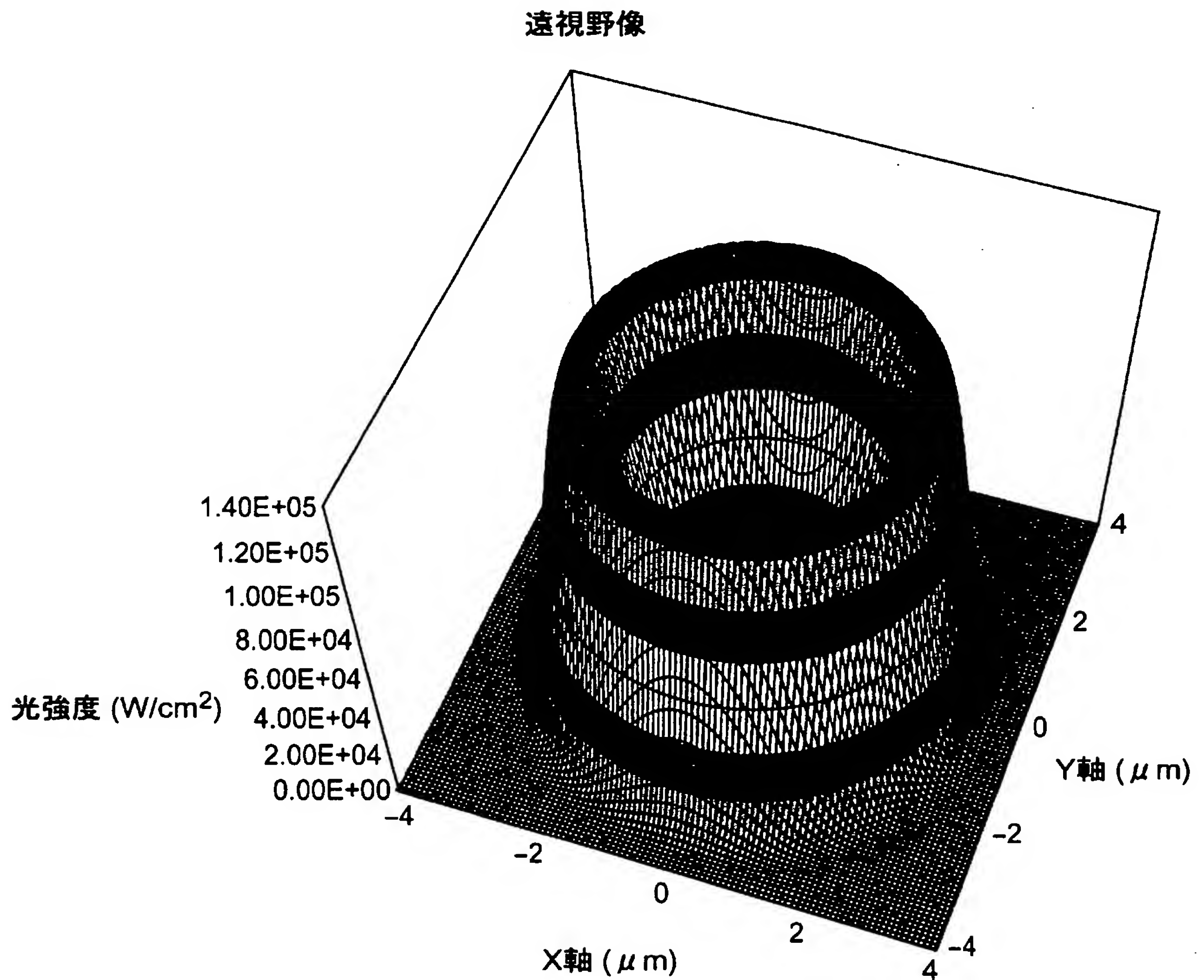




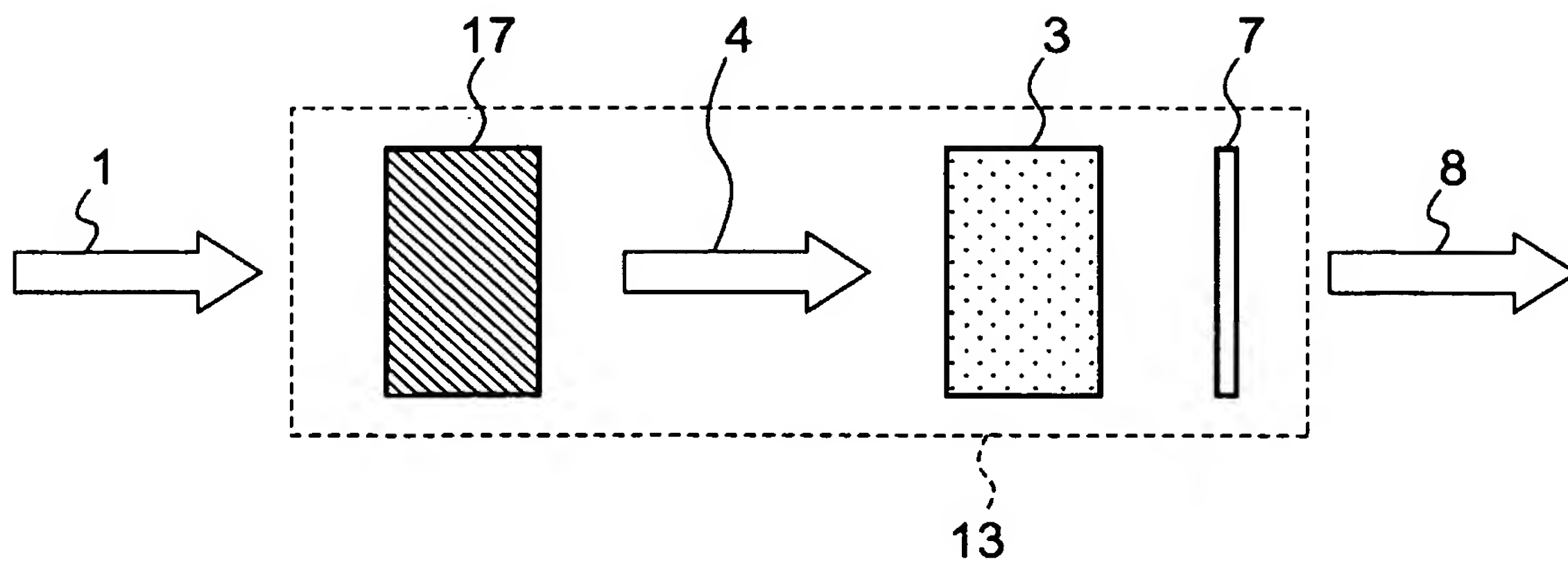
[図17]



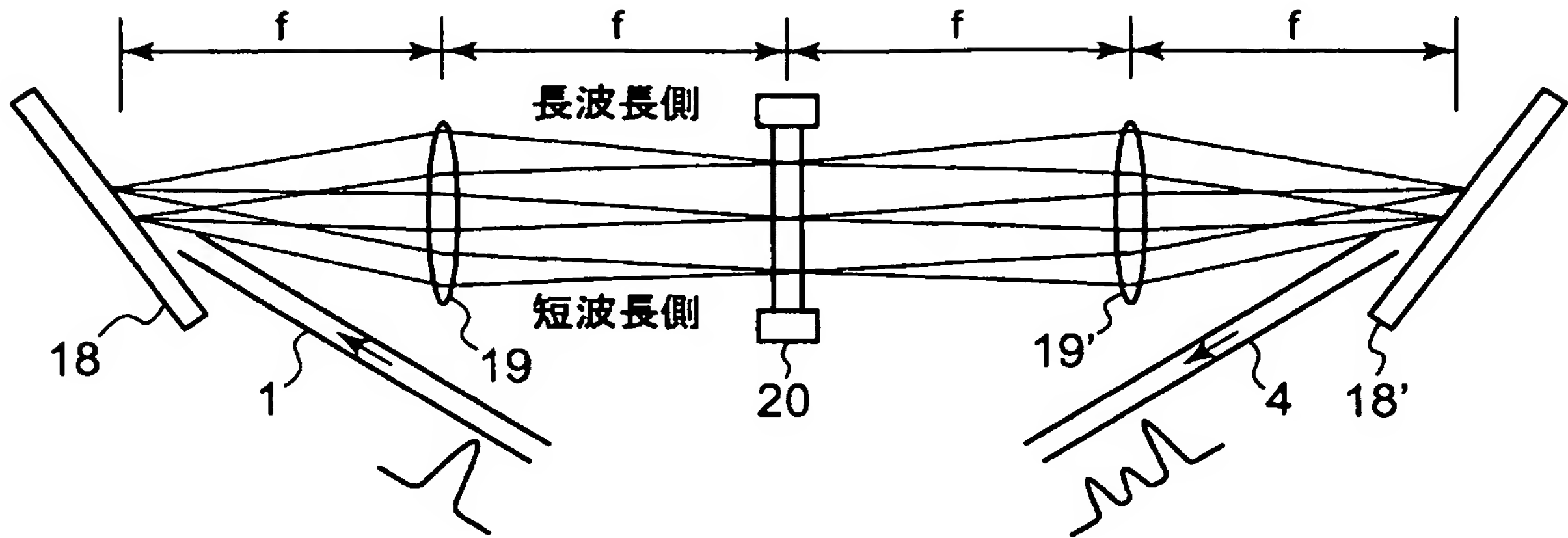
[図18]



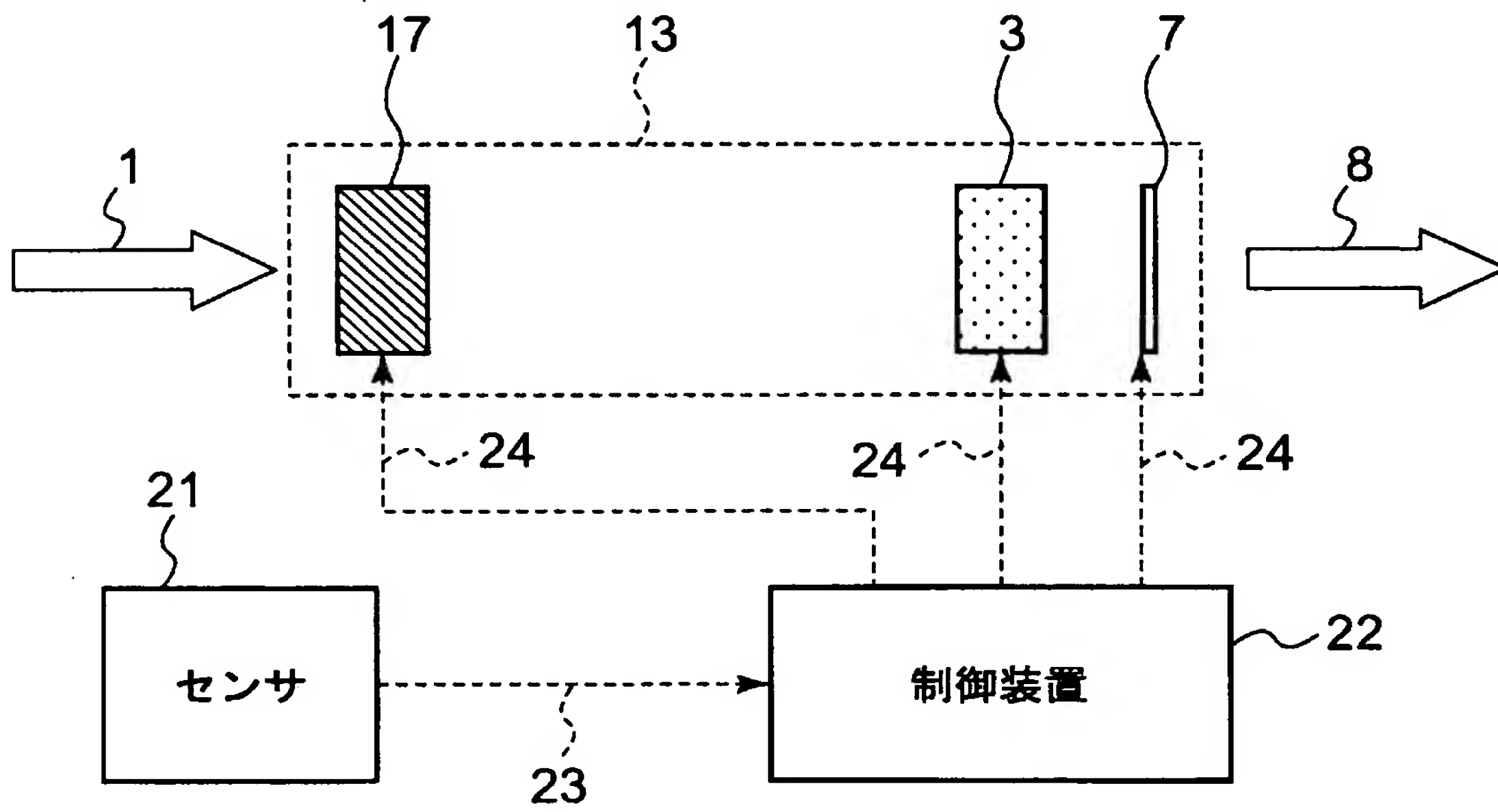
[図19]



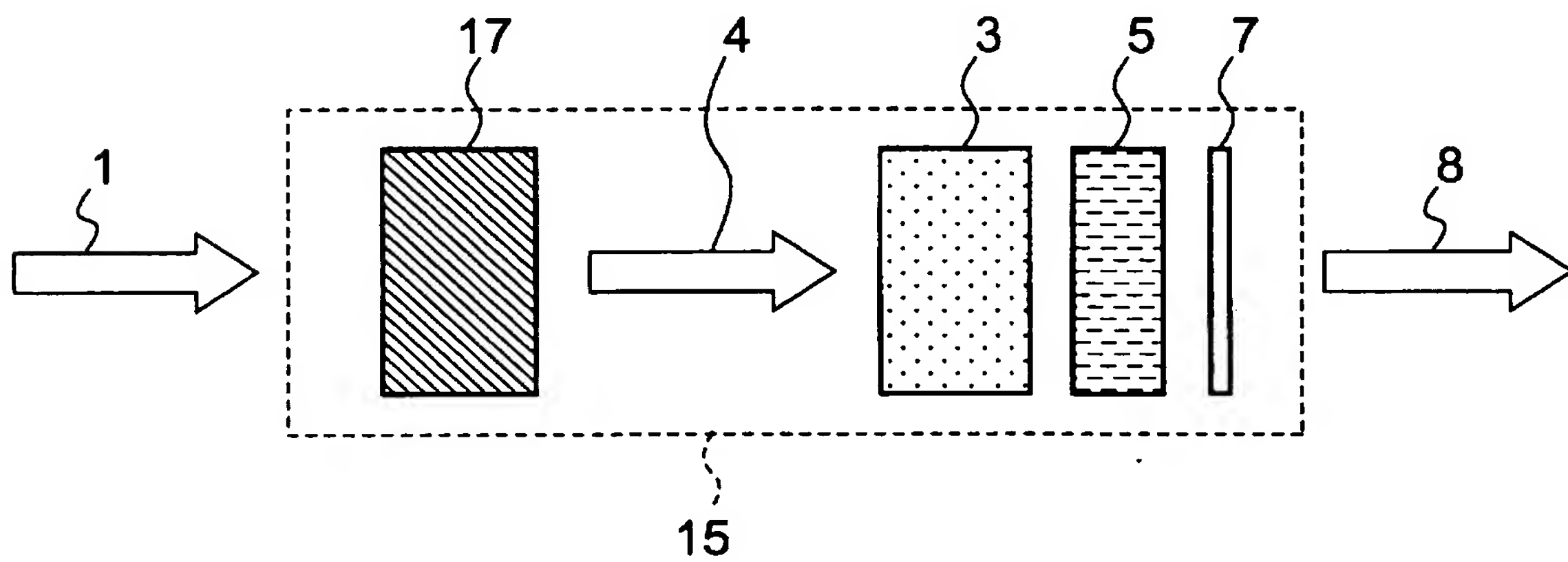
[図20]



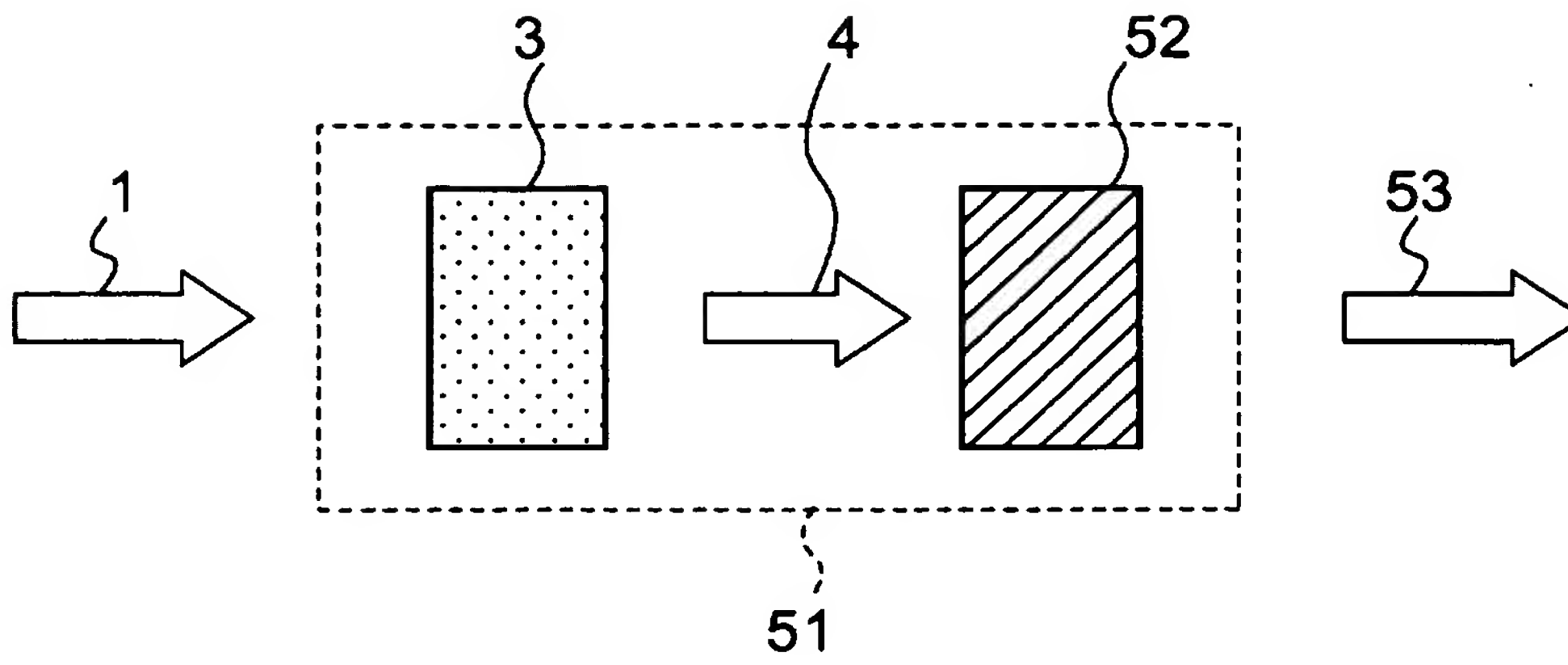
[図21]



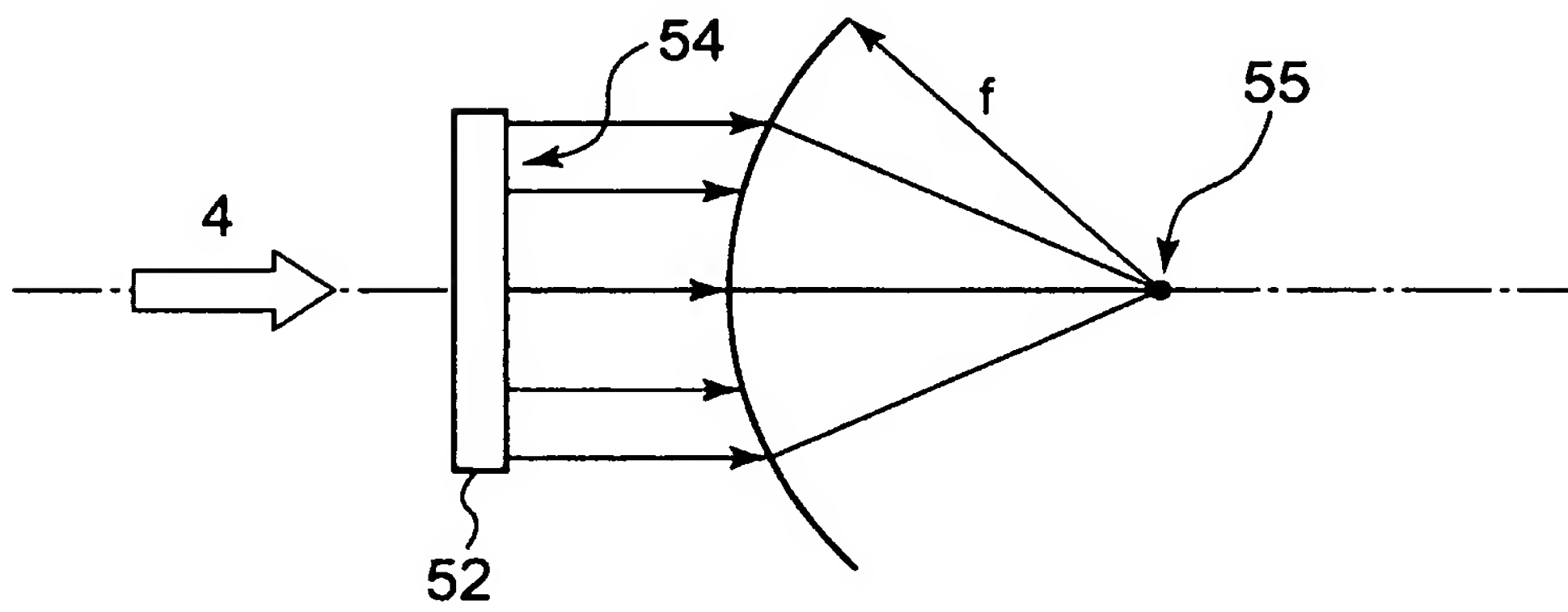
[図22]



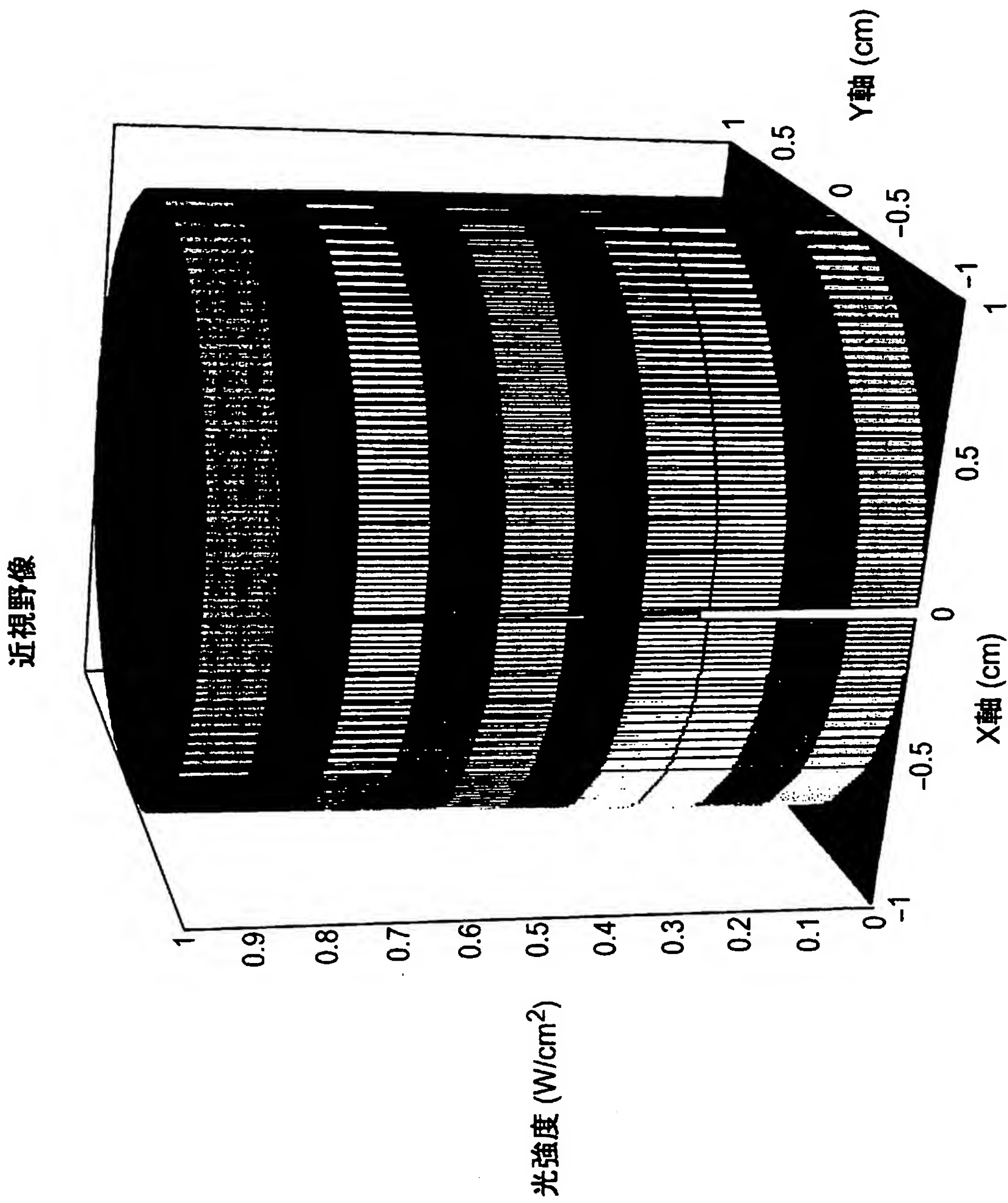
[図23]



[図24]

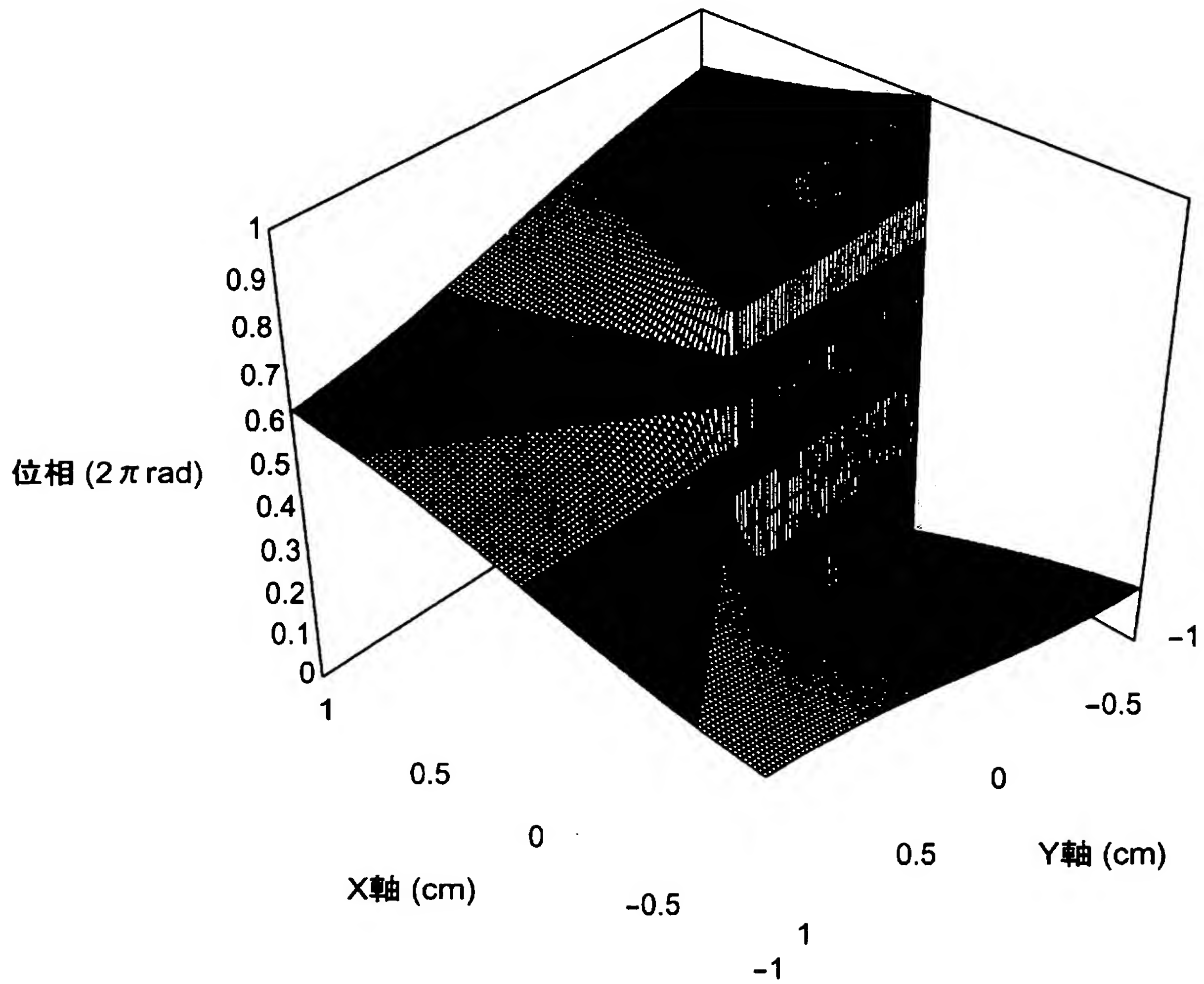


[図25]

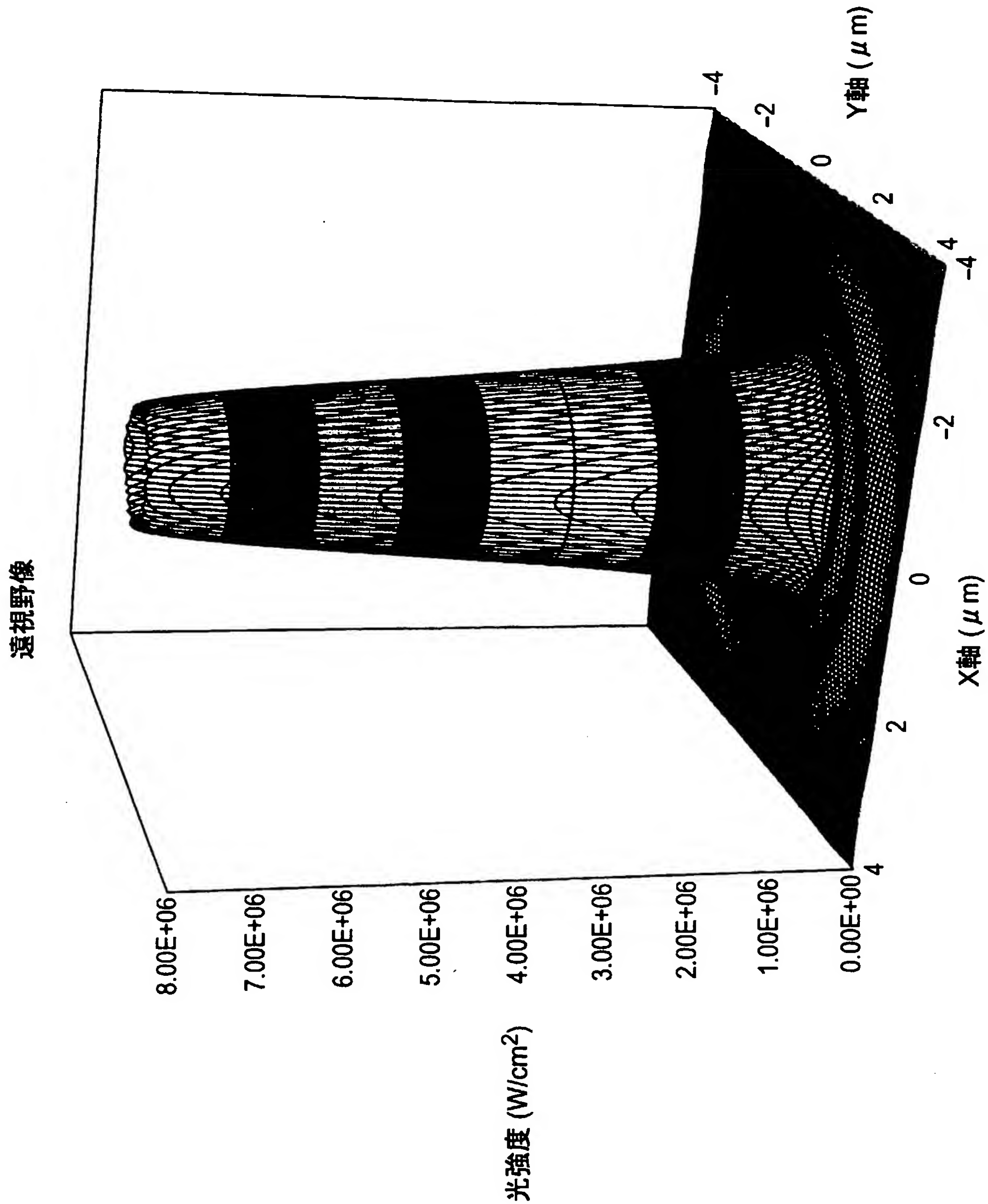




[図26]

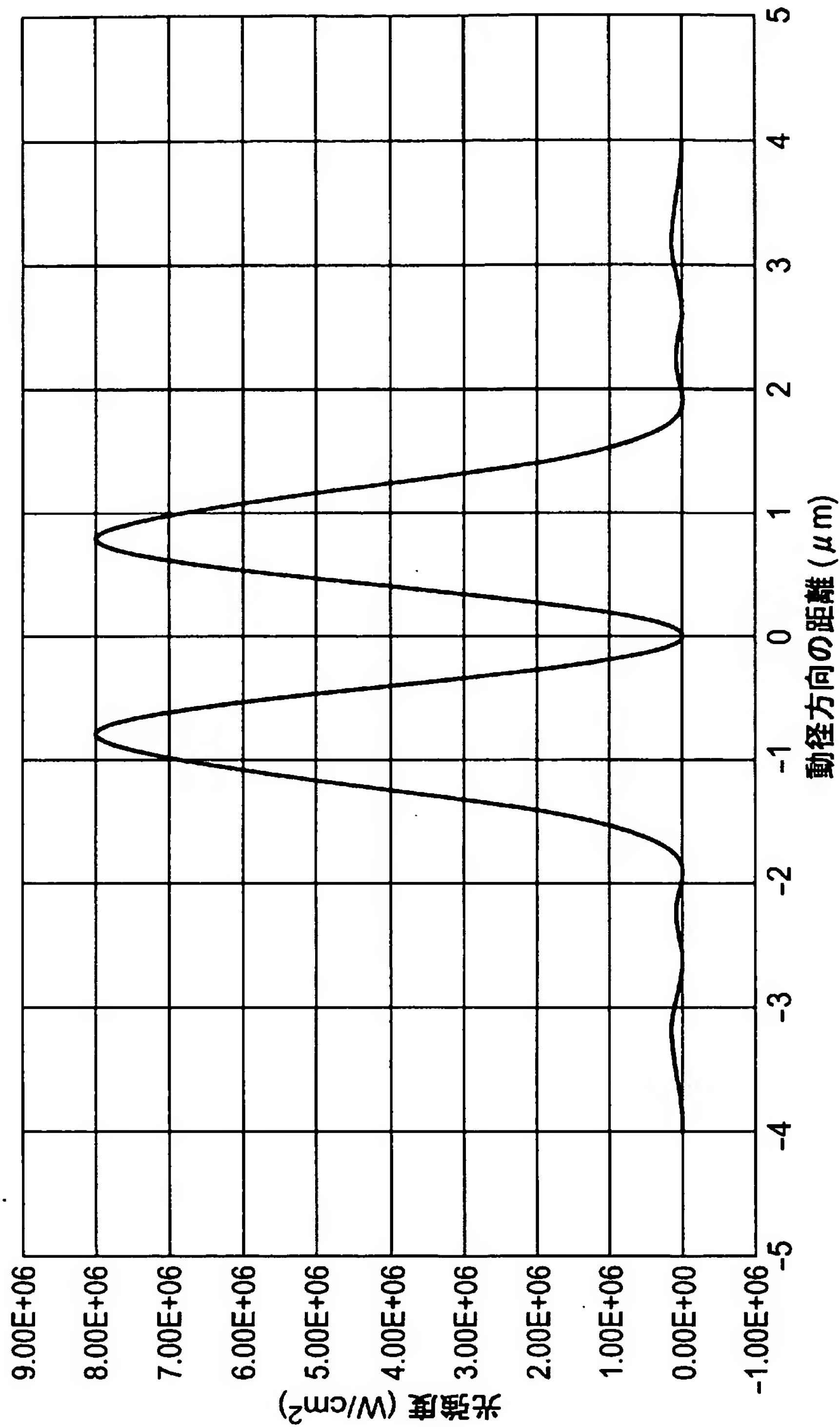
近視野位相 (位相回転: 1ピッチ $2\pi$  rad)

[図27]



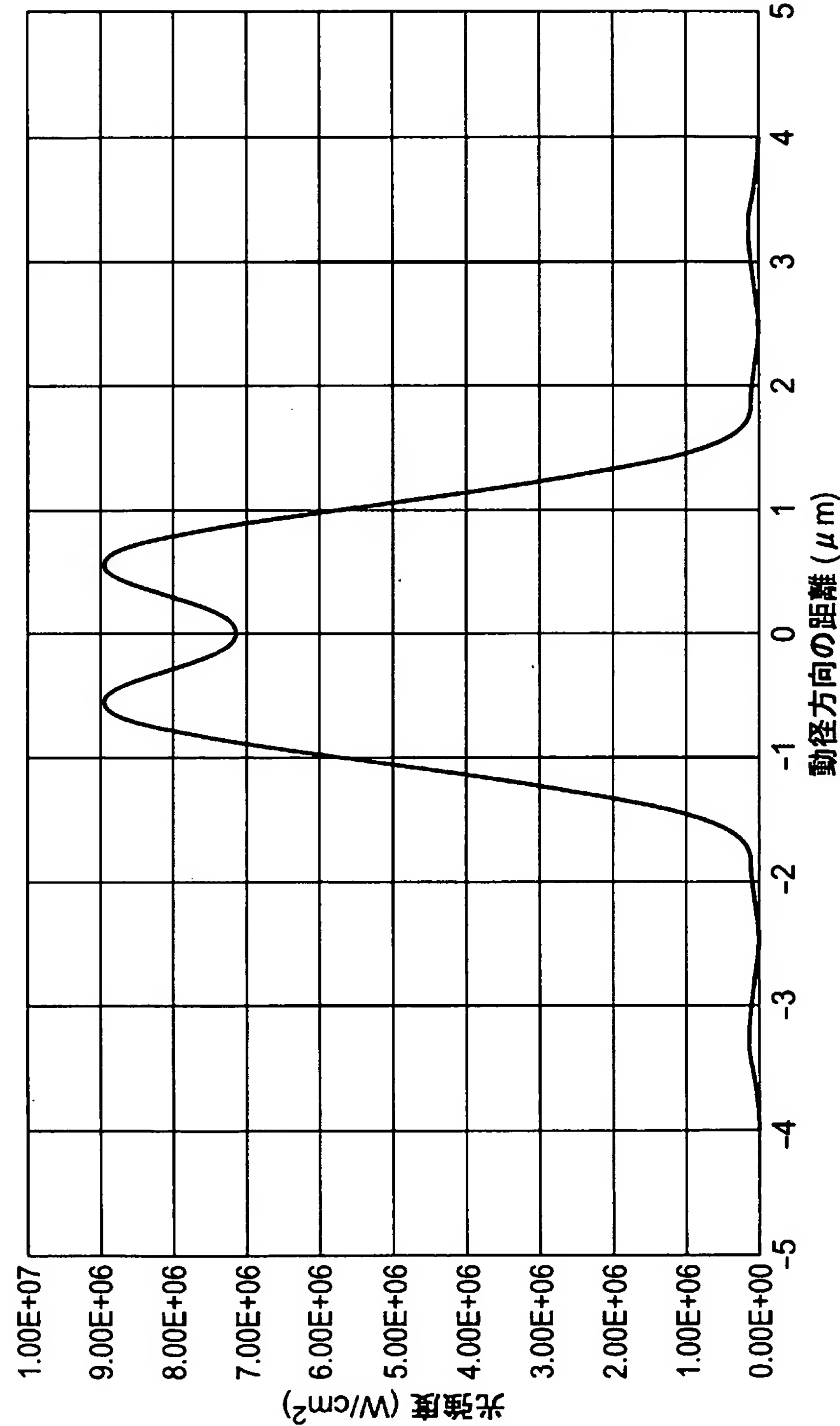
[図28]

遠視野断面形状 (位相回転、偏光角=0°)



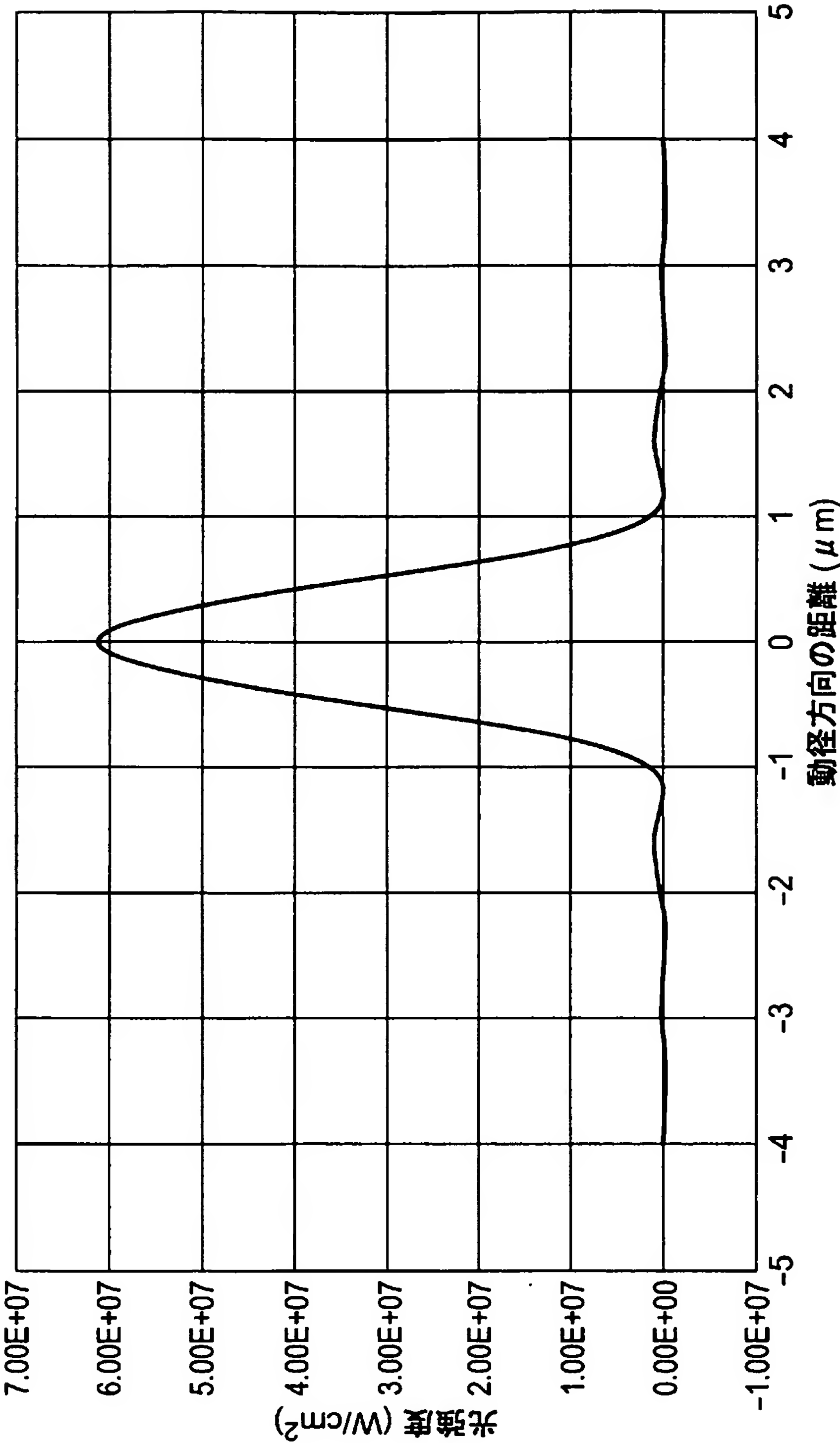
[図29]

遠視野像断面形状 (位相回転、偏光角=20° )



[図30]

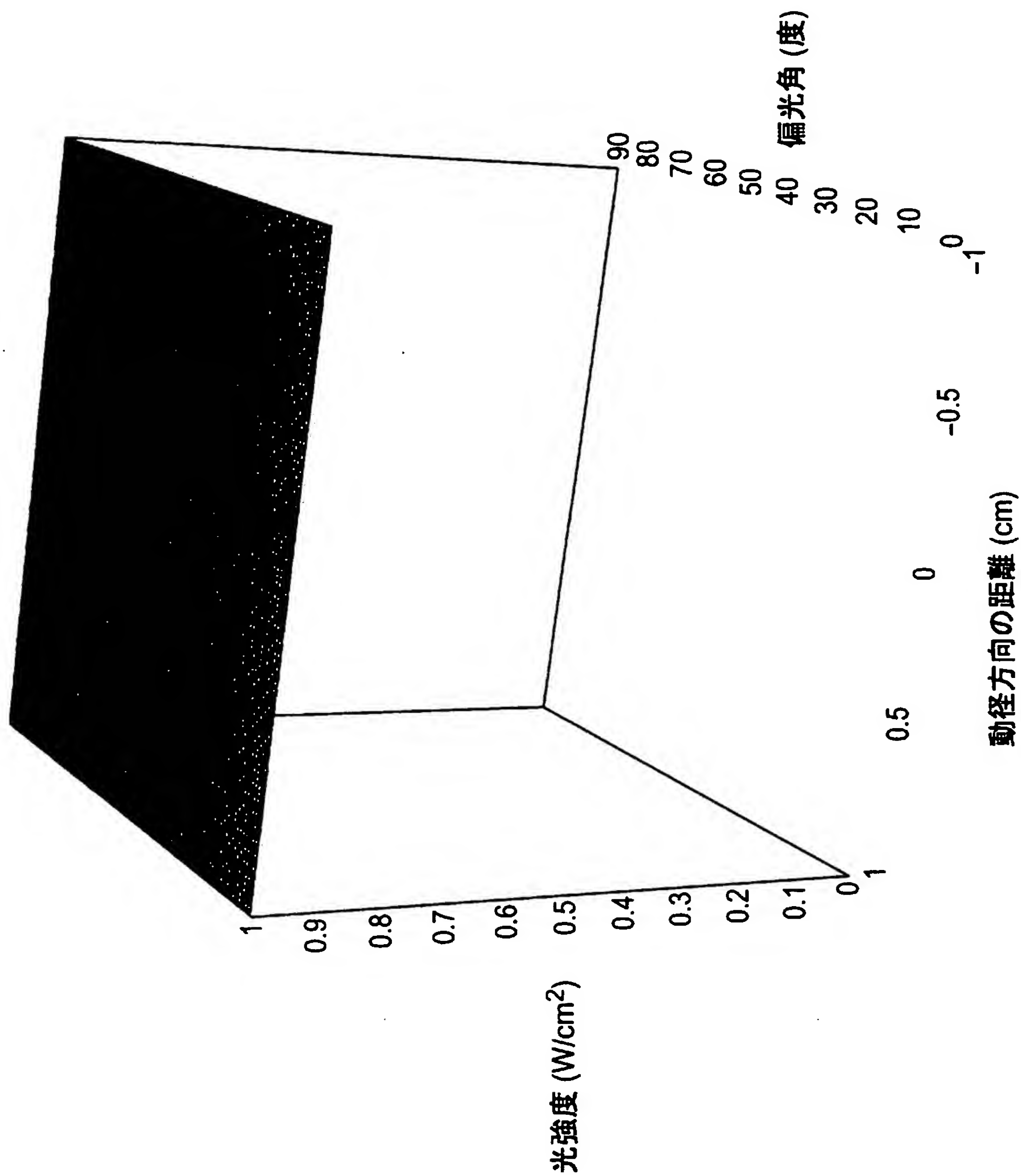
遠視野像断面形状 (位相回転、偏光角=90°)





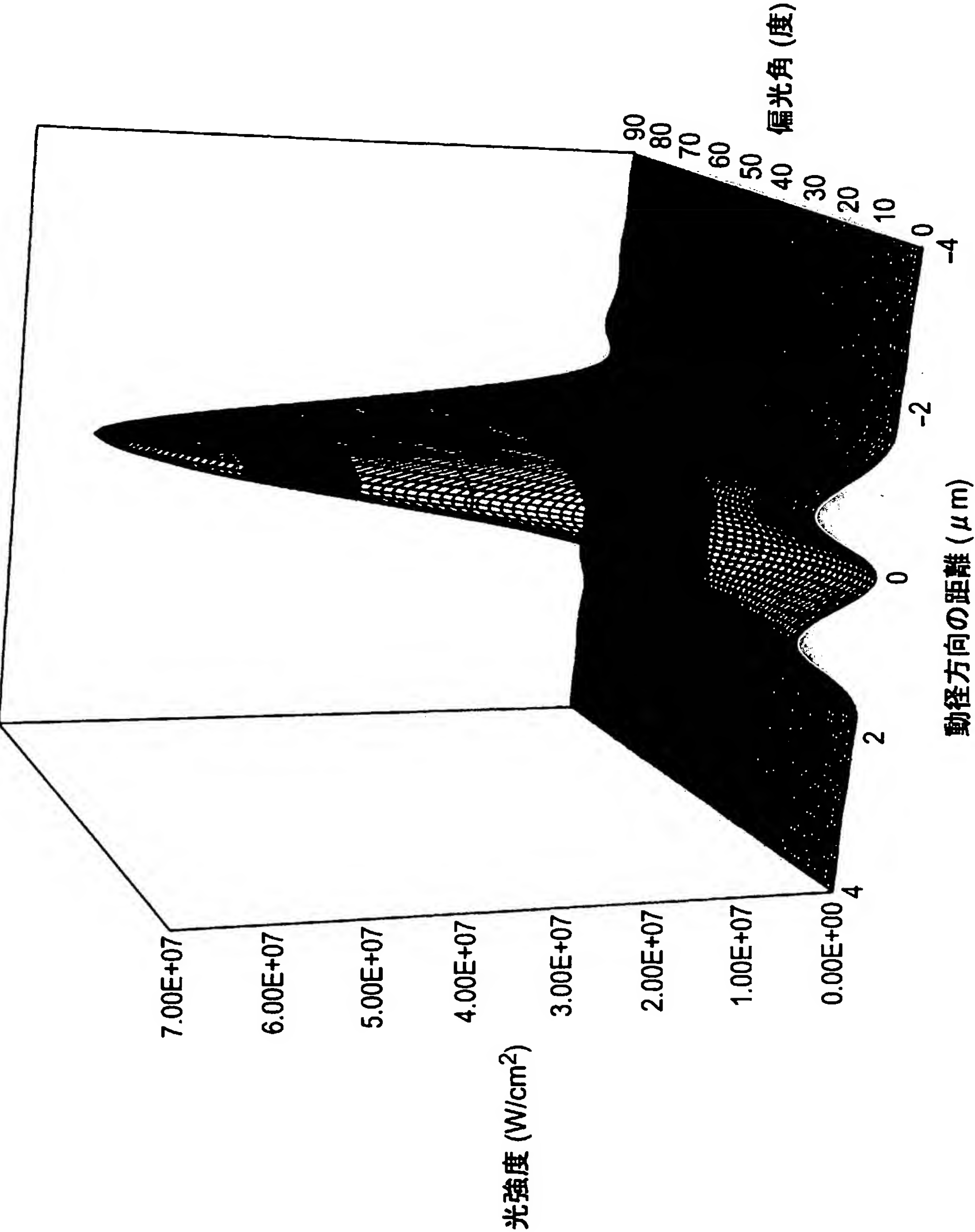
[図31]

近視野像断面形状(位相回転、円形開口平面波)



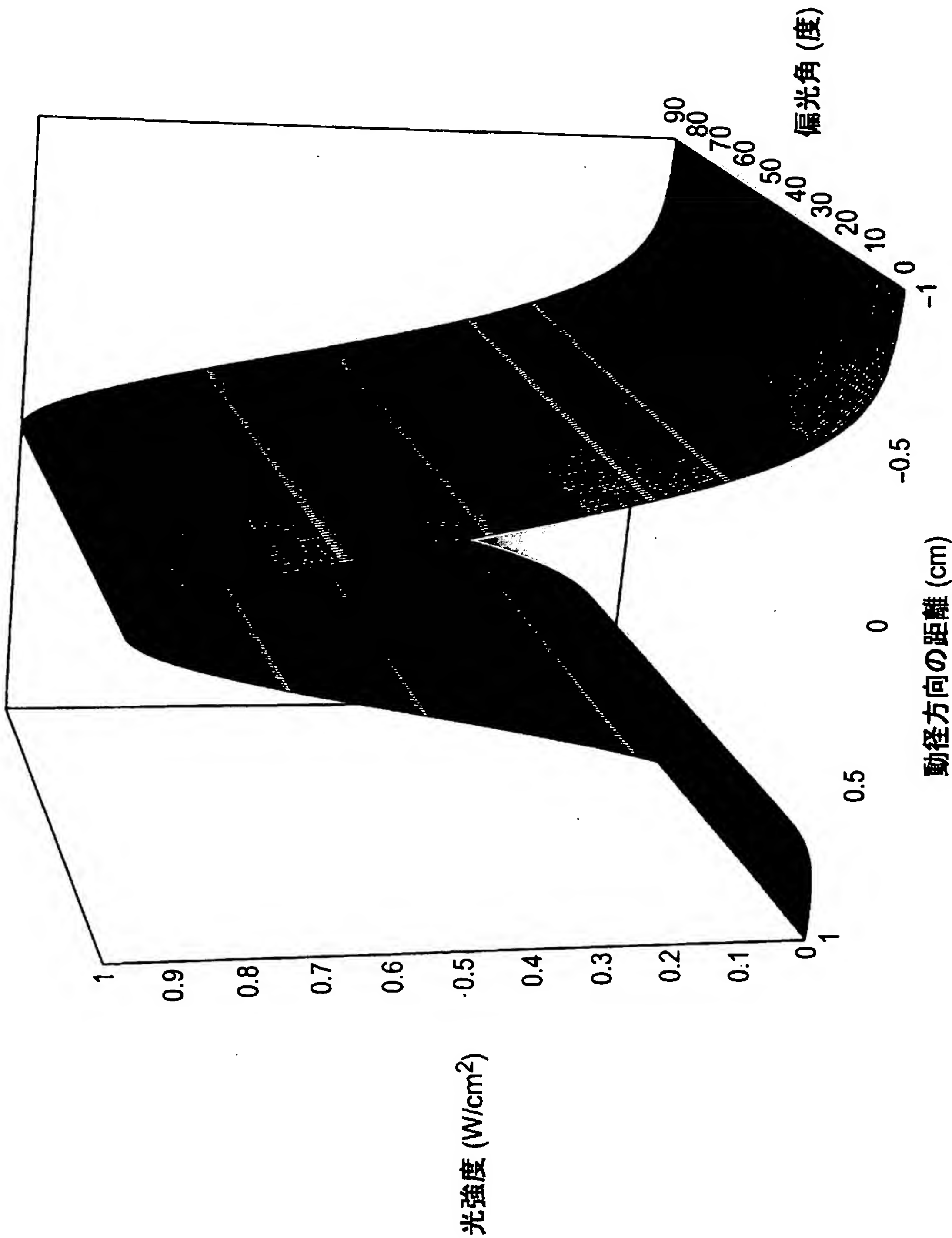
[図32]

遠視野像断面形状(位相回転、円形開口平面波)

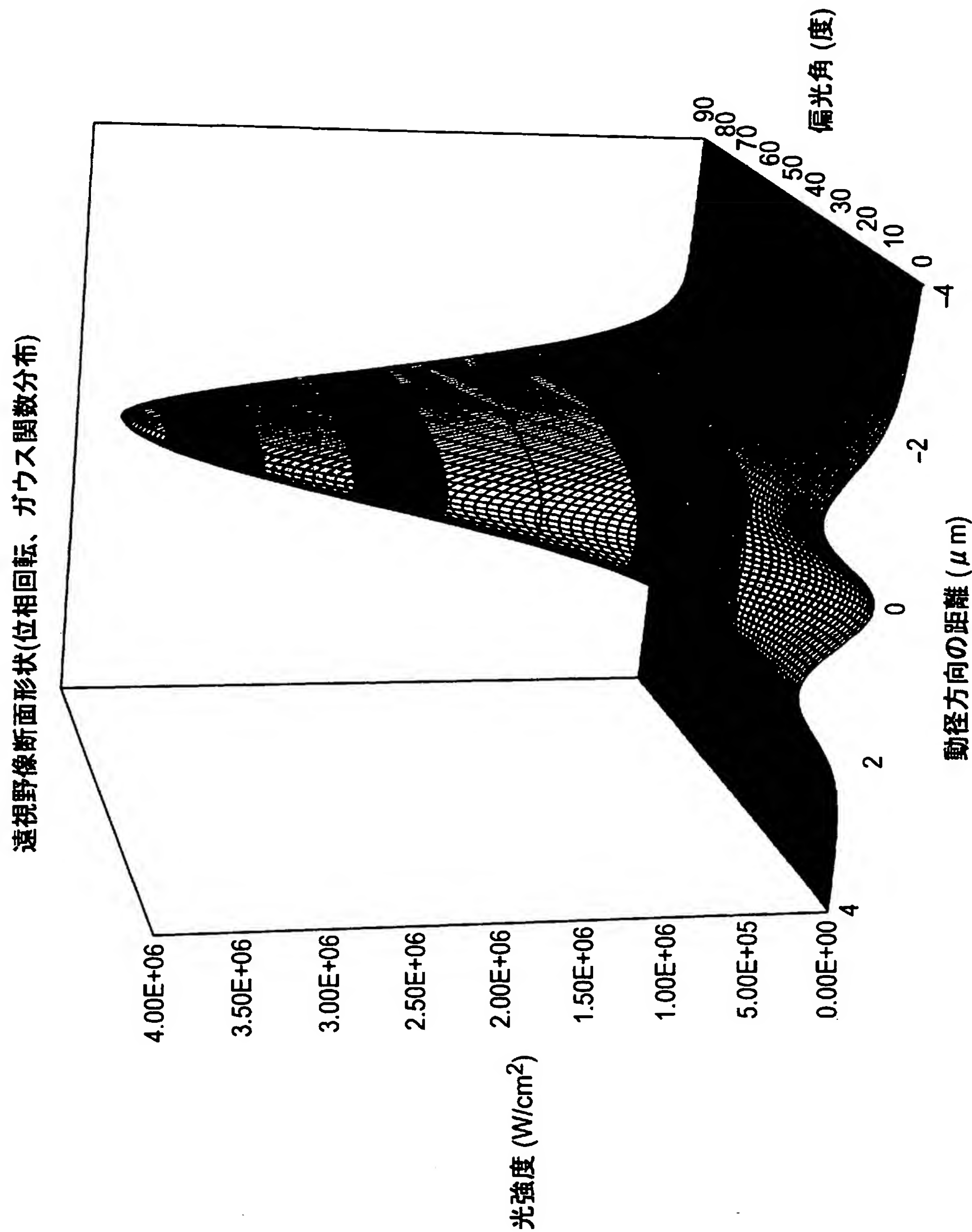


[図33]

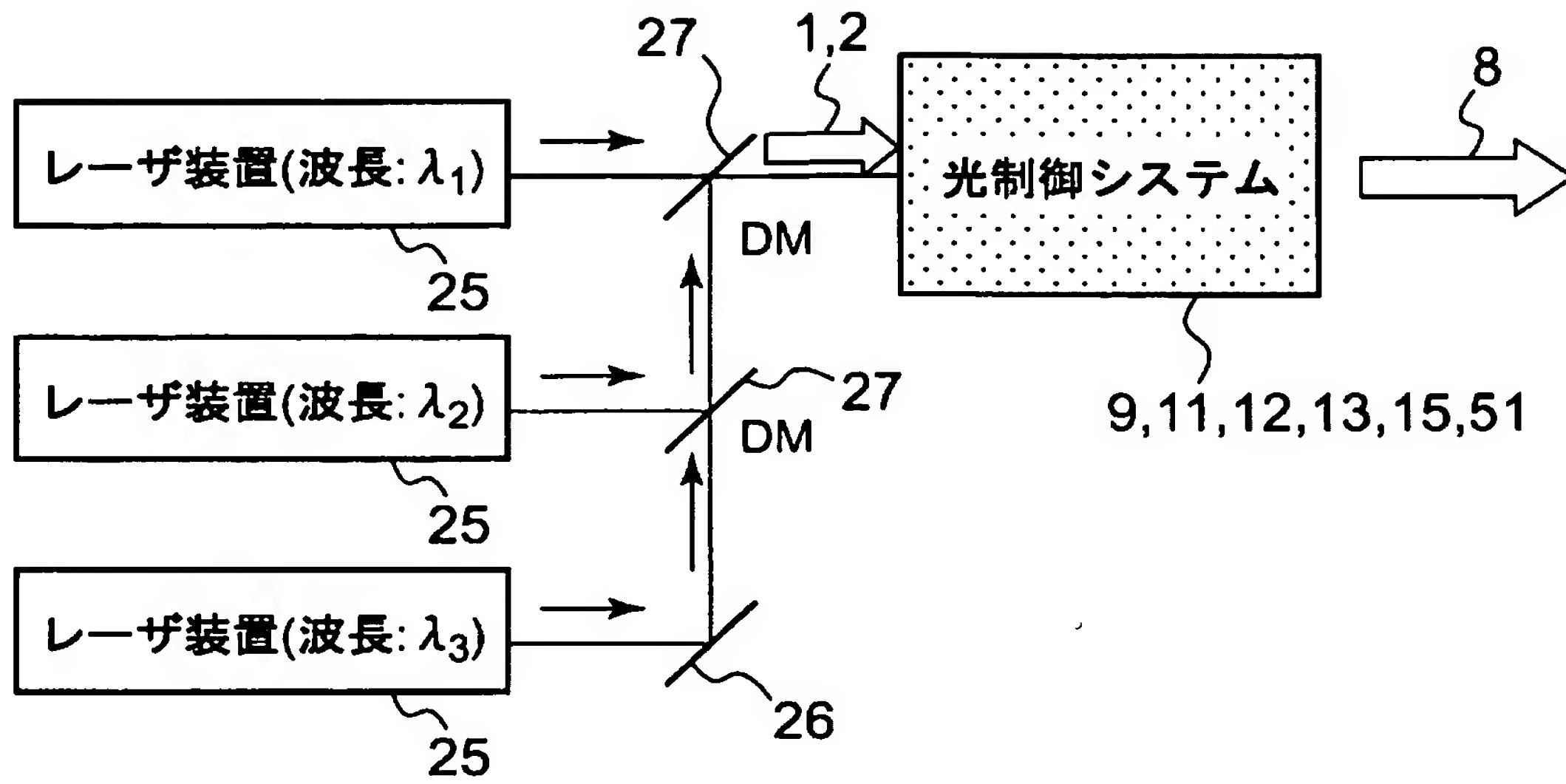
近視野像断面形状(位相回転、ガウス関数分布)



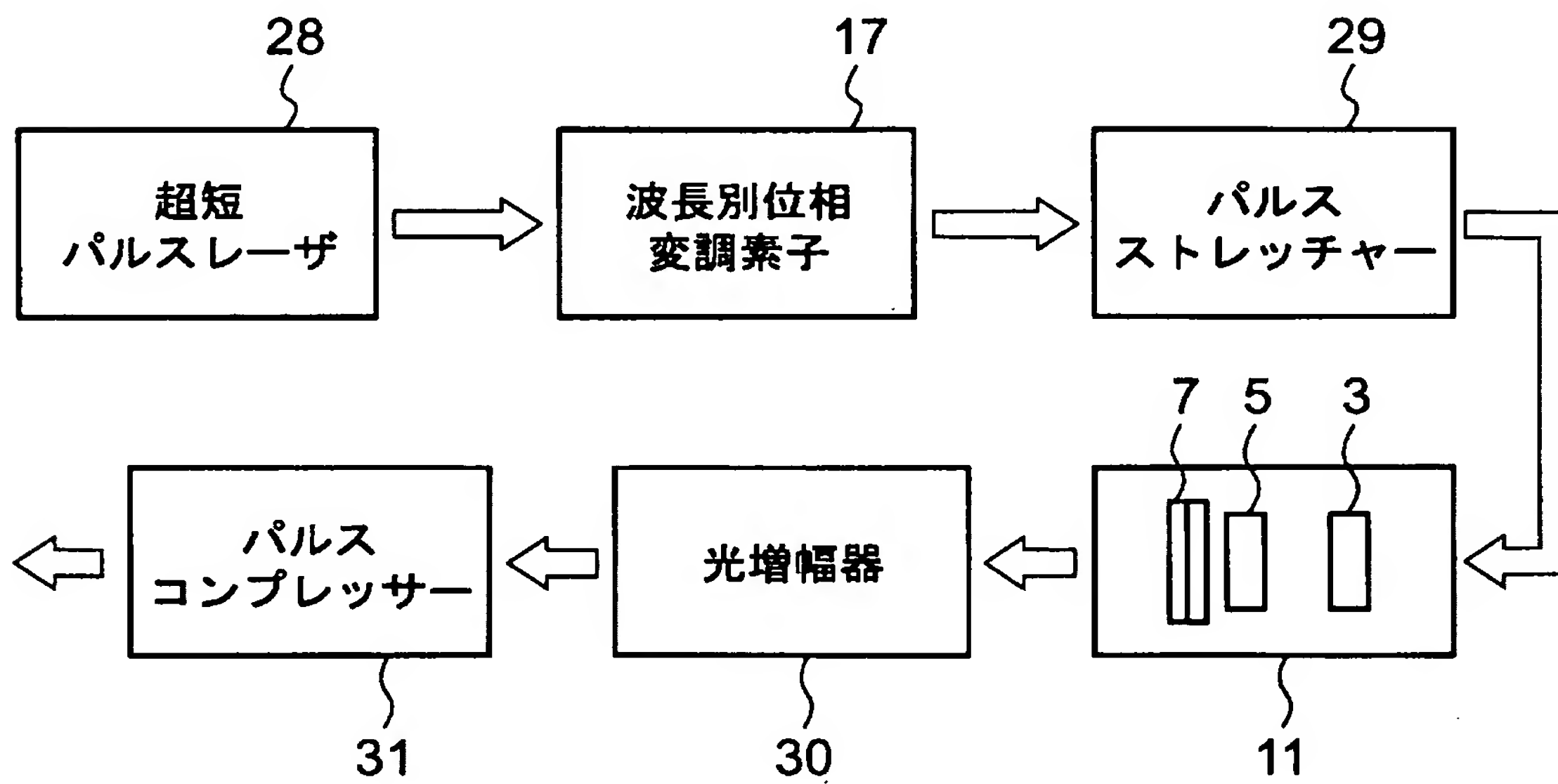
[図34]



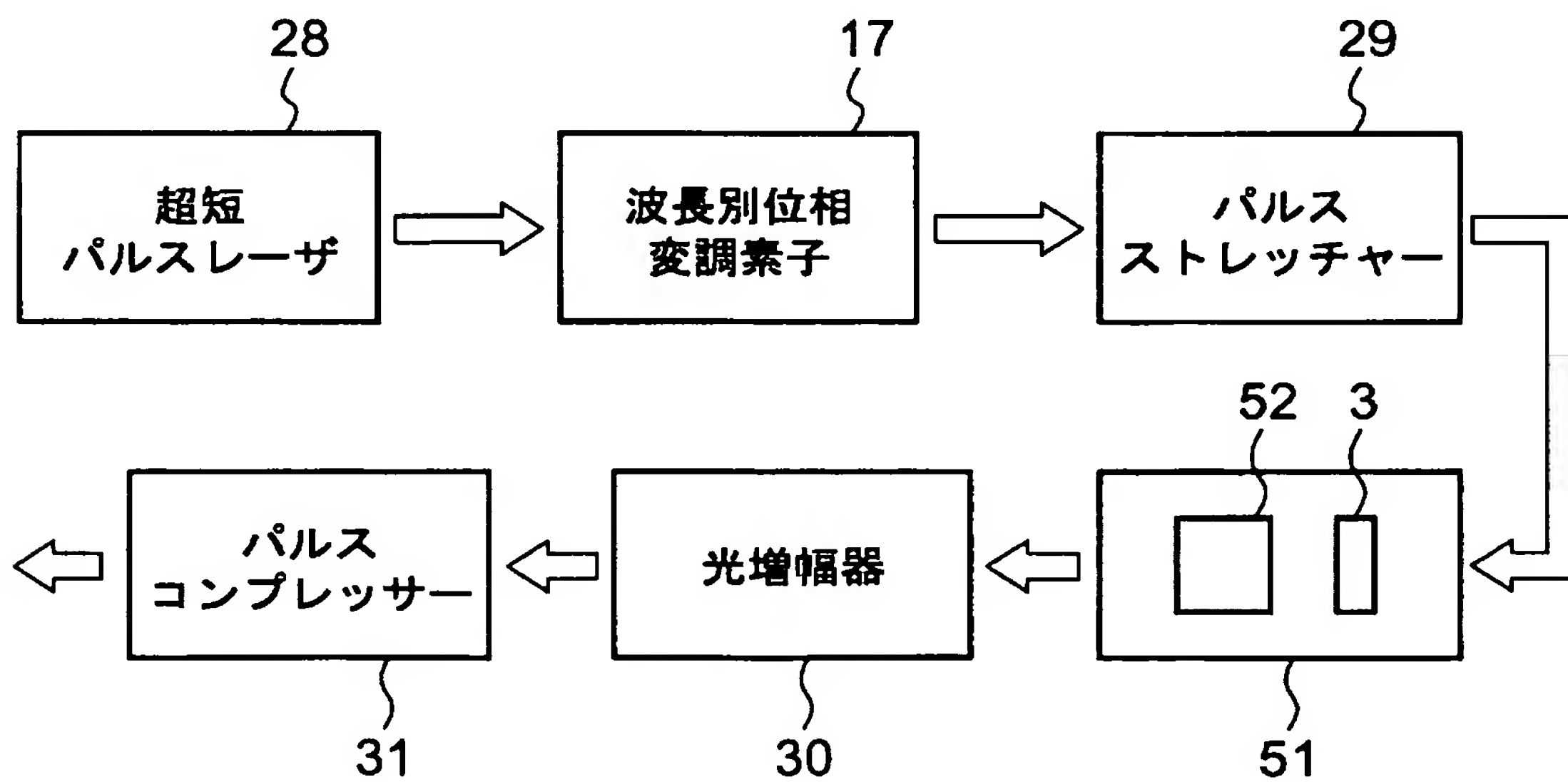
[図35]



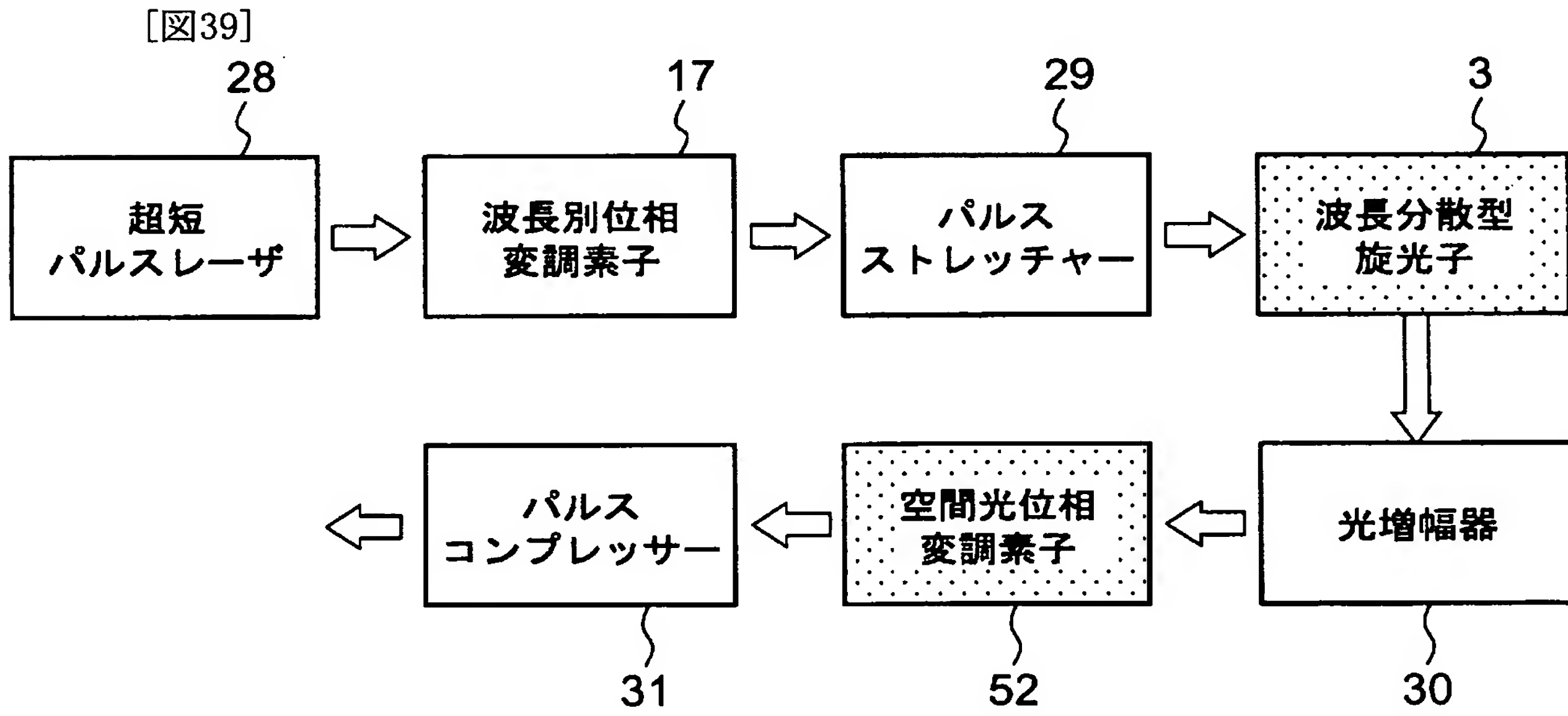
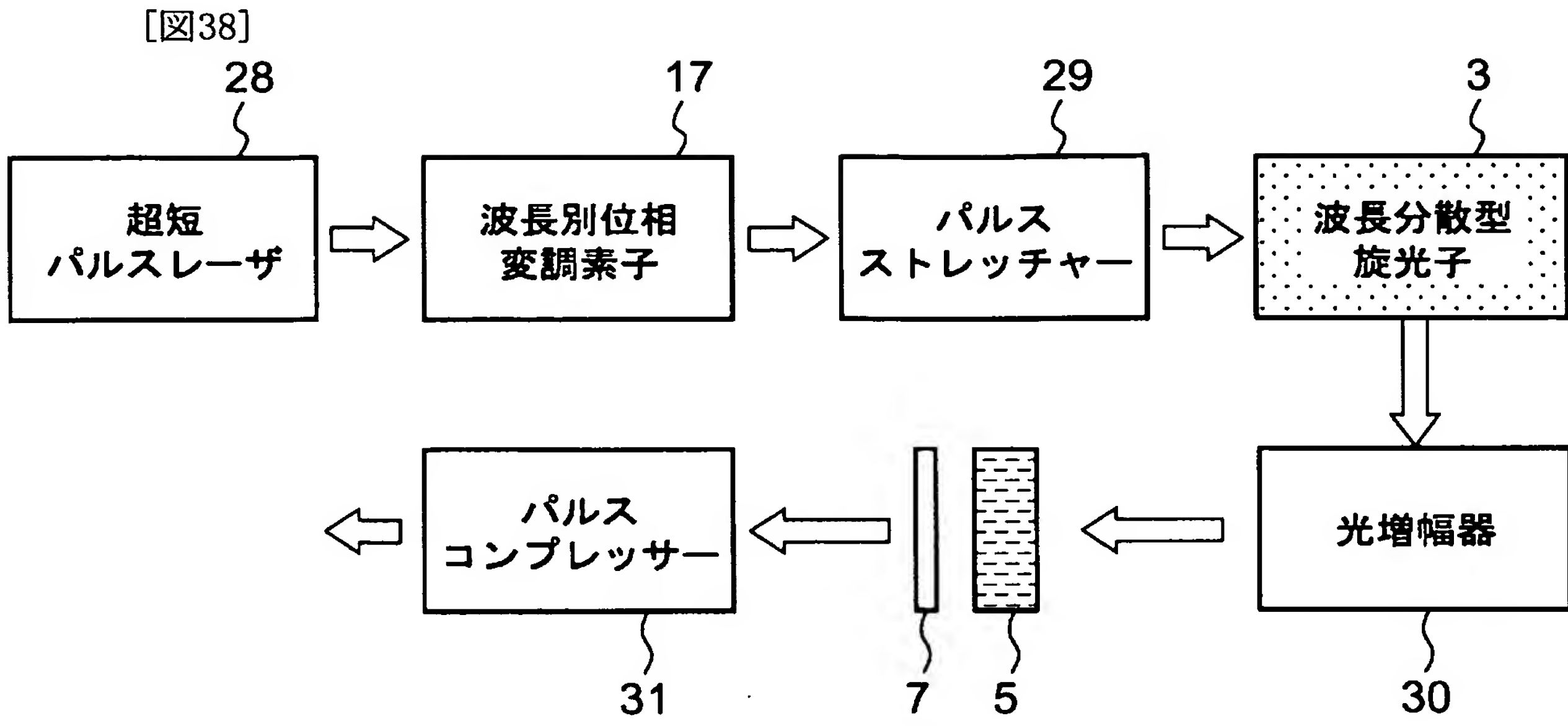
[図36]



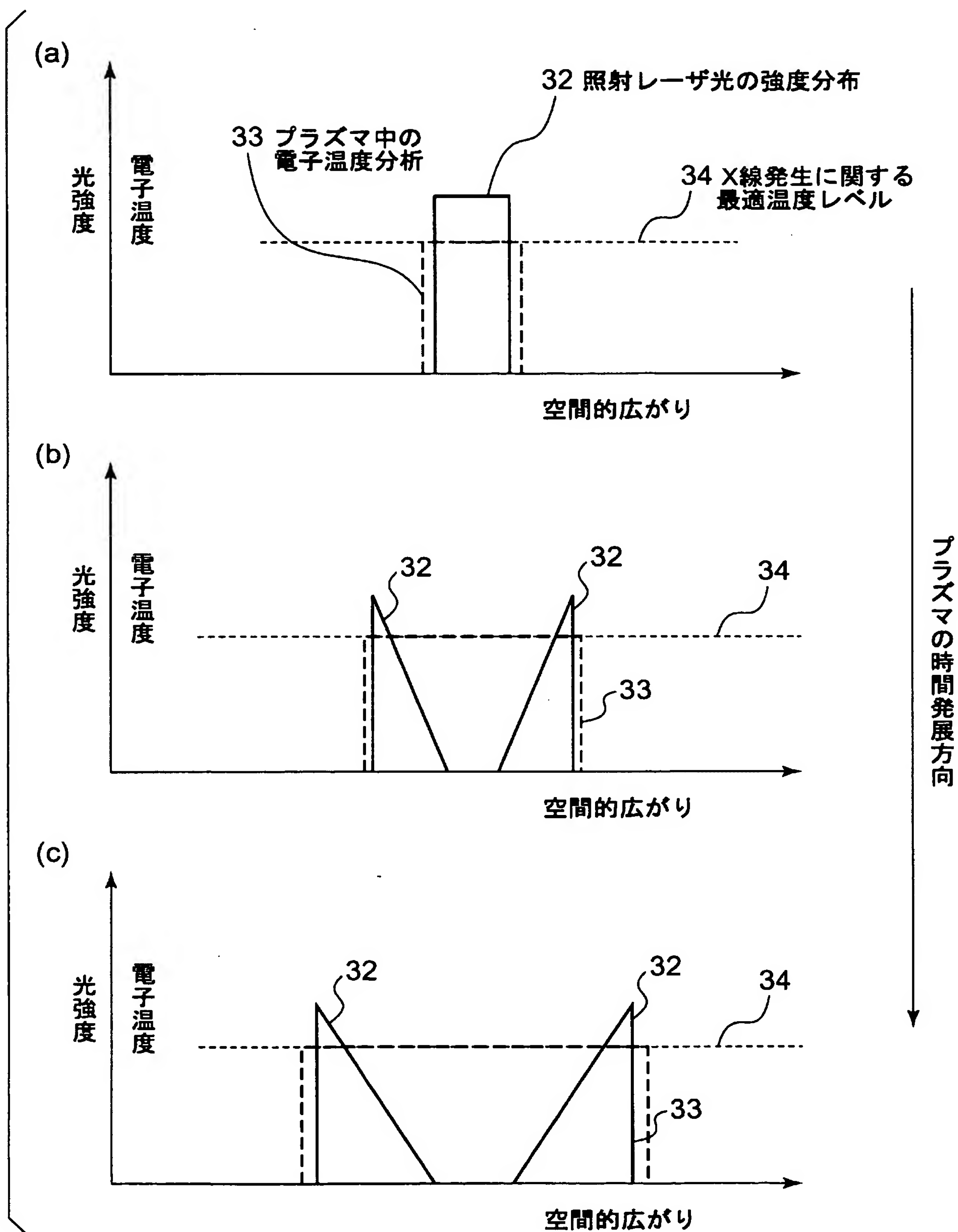
[図37]



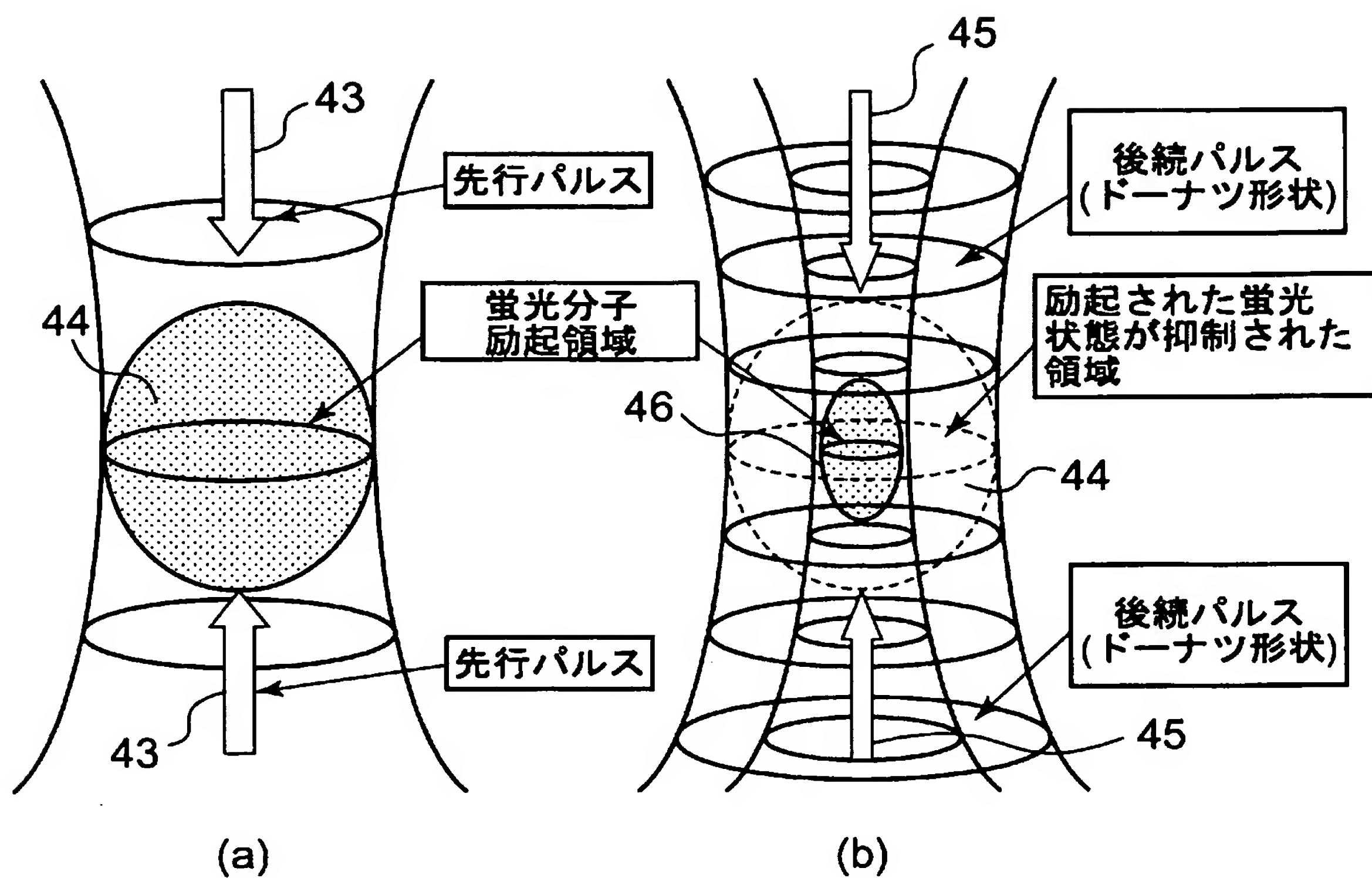




[図40]



[図41]



[図42]

